

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.7(072)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ОЦЕНКИ  
ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2017 В.Т. Саункин\*, И.Р. Григорьев\*\*, О.Е. Драка\*

\* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

\*\* Филиал ОАО «АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В работе рассматривается проблема контроля и оценки переходного процесса при механообработке крупногабаритных изделий атомного машиностроения. Механическую обработку изделий предлагается рассматривать как процесс резания в замкнутой технологической системе «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД). Предложена методика оценки времени переходного процесса, исходя из заданной ошибки измерения в динамическом режиме работы системы.

*Ключевые слова:* атомное энергетическое машиностроение, система «станок – приспособление – инструмент – деталь», переходный процесс, инерционность, качество обработки изделий.

Поступила в редакцию: 15.03.2017

Рассматриваемая система относится к электромеханическим, в которых большое значение имеет инерционность движущихся и вращательных частей. Инерционность и другие факторы могут быть причиной нарушения устойчивости работы системы и негативно сказаться на качестве обработки изделий во время переходного процесса.

Для составления модели процесса резания рассмотрим схему течения с одной степенью свободы. С целью упрощения расчета система СПИД представлена одномассовой системой с массой  $m$ , связанной упругой связью, имеющей жесткость  $C$  и коэффициент демпфирования  $\lambda$ , со станиной станка (рис. 1).

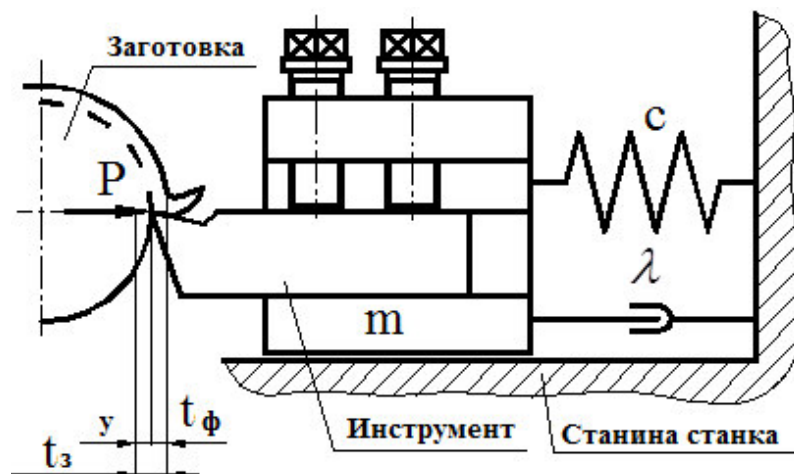


Рис. 1. – Схема модели процесса резания изделия в замкнутой технологической системе СПИД

Суппорту станка сообщается перемещение на заданную глубину резания  $t_3$  (по лимбу станка). В результате упругих деформаций системы под действием силы резания фактическая глубина резания  $t_\phi$  будет меньше поперечной подачи на величину упругих деформаций  $y$ :

$$t_\phi = t_3 - y. \tag{1}$$

Уравнение движения одномассовой системы имеет вид:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy = P, \tag{2}$$

где  $P$  – сила резания.

Процесс резания для упрощения модели с учетом малых значений постоянной времени стружкообразования ( $Tr = 10^{-4} \dots 10^{-3}$  с) представим безынерционным:

$$P = k_p t_\phi, \tag{3}$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи звена.

Таким образом, замкнутая технологическая система СПИД будет представлена в виде следующей модели:

$$\begin{cases} t_\phi = t_3 - y, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy = P, \\ P = k_p t_\phi. \end{cases} \tag{4}$$

Для дальнейшего исследования системы с помощью ЭВМ необходимо данную модель (4) привести к модели в пространстве состояний с помощью преобразования Лапласа. Для этого получим значение  $t_\phi$ .

Из выражения (1) имеем:

$$y = t_3 - t_\phi, \tag{5}$$

тогда

$$y' = - \frac{dt_\phi}{dt}, \tag{6}$$

$$y'' = - \frac{d^2 t_\phi}{dt^2}. \tag{7}$$

Подставим уравнения (5), (6) и (7) в выражение (2):

$$- m \frac{d^2 t_\phi}{dt^2} - \lambda \frac{dt_\phi}{dt} + ct_3 - ct_\phi = P. \tag{8}$$

Подставим уравнение (3) в выражение (8):

$$- m \frac{d^2 t_\phi}{dt^2} - \lambda \frac{dt_\phi}{dt} + ct_3 - ct_\phi = k_p t_\phi. \tag{9}$$

Преобразуем выражение (9):

$$-m \frac{d^2 t_\phi}{dt^2} - \lambda \frac{dt_\phi}{dt} - (c + k_p) t_\phi = -ct_3. \quad (10)$$

Представим уравнение (10) в операторной форме:

$$m\rho^2 t_\phi + \lambda\rho t_\phi + (c + k_p) t_\phi = ct_3. \quad (11)$$

Освободимся от коэффициента возле свободного члена уравнения (11):

$$\frac{m}{C + K_p} \rho^2 + \frac{\lambda}{C + K_p} \rho + 1 = \frac{ct_3}{(c + k_p) t_\phi}. \quad (12)$$

Фактическую глубину резания находим из уравнения (12):

$$t_\phi = \frac{ct_3}{m\rho^2 + \lambda\rho + (c + k_p)}. \quad (13)$$

Выражение (13) является общим уравнением для исследования рассматриваемой системы СПИД.

Чтобы использовать уравнение (13) в программах для исследования системы СПИД необходимо избавиться от коэффициента  $\rho^2$  (в знаменателе получим полином):

$$t_\phi = \frac{ct_3}{m} \frac{1}{\rho^2 + \frac{\lambda}{m} \rho + \frac{(c + k_p)}{m}}, \quad (14)$$

где  $\frac{ct_3}{m}$  – коэффициент усиления.

Для исследования системы СПИД используется программа Mathcad. Исходные данные для этой программы представлены матрицей объекта размером  $(2 \times 2)$ . В нее входят коэффициенты полинома из знаменателя уравнения (14). Первая строка матрицы  $A$  всегда имеет вид как в нижеприведенной формуле, где 1 – это коэффициент при  $\rho^2$ :

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ c + k_p & \lambda \\ m & m \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Вторая строка матрицы  $A$  представляет собой коэффициенты остальных членов полинома, взятые с обратным знаком. Причем, на первом месте стоит коэффициент при свободном члене, а на втором – коэффициент при  $\rho$ . Элементы матрицы в программу вводятся построчно.

Предлагаемая методика апробирована на реально существующей системе СПИД со следующими параметрами:  $m = 25000$  кг;  $c = 10000$  Н/м;  $\lambda = 2000$  кг/с;  $k_p = 0,75$  Н/мм;  $t_3 = 0,003$  м.

График переходного процесса в системе показан на рис. 2.

Как видно из графика, переходный процесс в системе колебательный затухающий. По графику можно определить время окончания переходного процесса и наступления установившегося режима в системе. Задаваясь допустимой ошибкой установившегося режима, можно определить время окончания переходного процесса системы и, следовательно, включения обработки изделия.

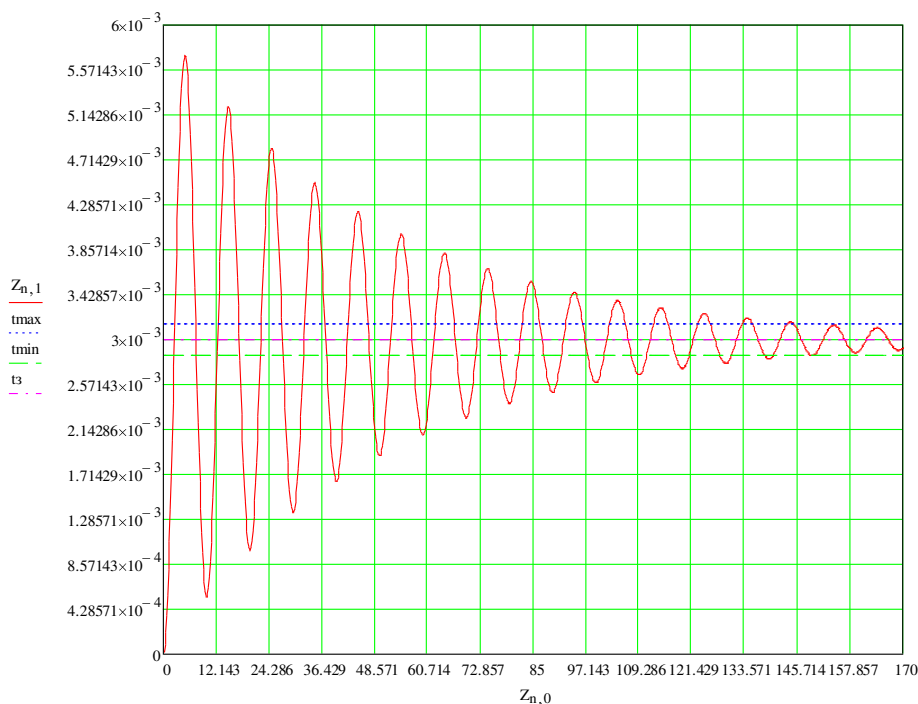


Рис. 2. – График переходного процесса системы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Советов, Б.Я. и др.* Моделирование систем: учебник для вузов [Текст] / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
2. *Кудрявцев, Е.М.* Компас – 3Д. Моделирование, проектирование и расчет механических систем [Электронный ресурс] / Е.М. Кудрявцев. – Электрон. текстовые данные. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.
3. *Гуськов, А.М. и др.* Устойчивость положений равновесия механических систем под действием неконсервативных (циркуляционных) сил [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсам «Основы прикладной теории механических колебаний», «Теория устойчивости движения механических систем» / А.М. Гуськов, Т.Я. Пановко. – Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2013. – 53 с.
4. *Шефер, К.* Теоретическая физика. Том 1. Часть 1. Общая механика. Механика твердого тела [Текст] / К. Шефер. – Санкт-Петербург, Книга по требованию, 2012. – 447 с.
5. *Шефер, К.* Теоретическая физика. Том 2. Часть 1. Общая механика. Механика твердого тела [Текст] / К. Шефер. – Санкт-Петербург: Книга по требованию, 2012. – 448 с.
6. *Саргосян, А.Е.* Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности [Текст] / А.Е. Саргосян. – М.: Высшая школа, 2000.
7. *Филин, А.П.* Прикладная механика твердого деформируемого тела [Текст] / А.П. Филин. – М.: Наука, 1981.
8. *Охорзин, В.А.* Прикладная математика в системе MATHCAD: учебное пособие. 3-е изд. [Текст] / В.А. Охорзин. – СПб.: Лань, 2009. – 352 с.
9. *Гольдберг, О.* Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования [Текст] / О. Гольдберг. – М.: Высшая школа. 2001.
10. *Кустов, Е.Ф. и др.* Модуль упругости, поверхностного натяжения, адгезии, идеальная и реальная прочность твердых тел [Текст] / Е.Ф. Кустов, М.Е. Кустов, В.А. Антонов // ЖТФ. – 2017. – Т. 87. – Вып. 4. – С. 563–569.

#### REFERENCES

- [1] *Советов В.Я., Яковлев С.А.* Modelirovanie sistem: uchebnik dlia vuzov [Modeling of systems: textbook for higher education institutions]. M. Pub. Vysshiaia shkola [Higher School], 2005, ISBN 5-06-003860-2, 343 p. (in Russian)
- [2] *Kudriavtsev E.M.* Kompas – 3D. Modelirovanie, proektirovanie i raschet mekhanicheskikh system [Compass – 3D. Modeling, design and calculation of mechanical systems]. Elektronnye tekstovye dannye [Electronic text data]. M. Pub. DMK Press, 2008, ISBN 978-5-94074-418-4, 400 p. (in Russian)

- Russian)
- [3] Guskov A.M., Panovko T.Ya. Ustoichivost polozhenii ravnovesiia mekhanicheskikh sistem pod deistviem nekonservativnykh (tsirkulatsionnykh) sil: uchebnoe posobie po kursam «Osnovy prikladnoi teorii mekhanicheskikh kolebaniia», «Teoriia ustoichivosti dvizheniia mekhanicheskikh sistem» [Stability of provisions of mechanical systems balance under the influence of nonconservative (circulating) forces [An electronic resource]: the manual at the courses "Bases of the Applied Theory of Mechanical Oscillations", "Theory of Stability of the Movement of Mechanical Systems"]. Elektronnye tekstovye dannye [Electronic text data]. M. Pub. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana [Bauman Moscow State Technical University], 2013, ISBN 978-5-7038-3656-9, 53 p. Available at: [http://rk5-lib.bmstu.ru/files/upb/din\\_mech\\_sist\\_guskov.pdf](http://rk5-lib.bmstu.ru/files/upb/din_mech_sist_guskov.pdf) (in Russian)
  - [4] Shefer K. Teoreticheskaiia fizika [перевод]. Vol. 1. Chast 1 [Theoretical Physics. Part 1]. Obshchaia mekhanika. Mekhanika tverdogo tela [General mechanics. Mechanics of a solid body]. Sankt-Peterburg [St. Petersburg]. Pub. Kniga po trebovaniu [Book on demand], 2012, ISBN 978-5-458-49839-5, 447 p. (in Russian)
  - [5] Shefer K. Teoreticheskaiia fizika. Vol. 2. Chast 1 [Theoretical Physics. Part 1]. Obshchaia mekhanika. Mekhanika tverdogo tela [General mechanics. Mechanics of a solid body]. Sankt-Peterburg [St. Petersburg]. Pub. Kniga po trebovaniu [Book on demand], 2012, ISBN 978-5-458-37433-0, 448 p. (in Russian)
  - [6] Sargosian A.E. Soprotivlenie materialov, teorii uprugosti i plastichnosti [Resistance of materials, theories of elasticity and plasticity]. M. Pub. Vysshaia shkola [Higher School], 2000. ISBN 5-06-003866-1, Available at: [sopromat.vstu.ru/metod/ucheb/ucheb\\_09.djvu](http://sopromat.vstu.ru/metod/ucheb/ucheb_09.djvu) (in Russian)
  - [7] Filin A.P. Prikladnaia mekhanika tverdogo deformiruemogo tela [Applied mechanics of a solid deformable body]. M. Pub. Nauka, 1981. (in Russian)
  - [8] Okhorzin V.A. Prikladnaia matematika v sisteme MATHCAD [Applied mathematics in the MATHCAD system]: Uchebnoe posobie [Manual]. 3-e izdanie [3rd edition]. Sankt-Peterburg [St. Petersburg]. Pub. Lan [Lan], 2009, ISBN 978-5-8114-0814-6, 352 p. (in Russian)
  - [9] Goldberg O. Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh i apparatakh i voprosy ikh proektirovaniia [Transition processes in electrical machines and devices and questions of their design]. M. Pub. Vysshaia shkola [Higher School], 2001, ISBN 5-06-003844-0, 512 p. (in Russian)
  - [10] Kustov E.F., Kustov M.E., Antonov V.A. Modul uprugosti, poverkhnostnogo natiazheniia, adgezii, idealnaia i realnaia prochnost tverdykh tel [Module of elasticity, superficial tension, adhesion, ideal and actual durability of solid bodies]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Magazine of technical physics], 2017, Vol. 87, Vypusk 4 [Issue 4]. ISSN 0044-4642, DOI: 10.21883/JTF.2017.04.44317.2026, pp. 563–569. (in Russian)

## Development of Methodical Recommendations of Transition Process Assessment When Processing Large-Size Products Mechanically

**V.T. Saunkin\*<sup>1</sup>, I.R. Grigoriev\*\*<sup>2</sup>, O.E. Draka\*<sup>3</sup>**

\* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*e-mail: VITkafIUS@mephi.ru*

<sup>1</sup> *ORCID iD: 000-0002-3462-4853*

*WoS ResearcherID: F-3352-2017;*

<sup>3</sup> *ORCID iD: 000-0002-3397-6830*

*WoS ResearcherID: F-3316-2017*

\*\* *Volgodonsk branch of JSC «AEM-technologies» «Atomash», Zhukovskoye shosse, 10, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

<sup>2</sup> *ORCID iD: 000-0002-5654-5021*

*WoS ResearcherID: F-3370-2017*

**Abstract** – The problem of control and an assessment of transition process when processing large-size products of atomic mechanical engineering is considered in the work. Machining of products is offered to be considered as process of cutting in the closed technological system "machine – adaptation – tool - detail" (MATD). The technique of an assessment of transition process time, proceeding from the set measurement error in a dynamic operating mode of system is offered.

**Keywords:** atomic power engineering, "machine – adaptation – tool - detail" system, transition process, lag effect, product processing quality.