

НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

А.С. Васильев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Основной задачей производства машин является обеспечение их эксплуатационного качества, прямо зависящего от эксплуатационных свойств деталей. Эксплуатационные свойства, как отдельных поверхностей, так и деталей в целом – свойства, способствующие выполнению деталью заданных функций при заданном ресурсе и условиях эксплуатации. Традиционная методология технологического обеспечения эксплуатационных свойств исходит из необходимости обеспечения при изготовлении детали заданных производственно-технологических показателей качества в предположении, что они гарантируют достижение заданных эксплуатационных свойств. Между тем доказано, что разные множества и последовательности технологических методов могут приводить к близким значениям производственно-технологических показателей качества деталей, но существенно разным их эксплуатационным свойствам. Методология технологического проектирования, базирующаяся на суперпозиции результатов технологических воздействий на предмет производства себя исчерпала.

Предложенная концепция направленного формирования свойств изделий (в частности, деталей) рассматривает их достигнутое качество как результат трансформации его отдельных показателей, учитывающий как оперативное воздействие на предмет производства, так и наследование, и взаимное влияние формирующихся свойств. Для описания трансформации разработан математический аппарат, позволяющий ее детерминированное и стохастическое моделирование.

В представленной работе изложено приложение рассматриваемой концепции к направленному формированию заданных эксплуатационных свойств изделий на примере деталей. Перспективно формирование технологических решений, гарантированно обеспечивающих явно заданные эксплуатационные свойства исполнительных поверхностей или детали в целом.

Показано, что необходимый и достаточный уровень гарантированного обеспечения заданных эксплуатационных свойств должен быть ограничен и учитывать влияние эмерджентности технологического процесса как системы на результаты реализующихся в ней элементарных решений.

Ключевые слова: технология, деталь, эксплуатационное свойство, формирование, обеспечение, направленность.

Введение

Любая деталь машины – упорядоченный комплекс исполнительных и связующих поверхностей. Исполнительные поверхности обеспечивают выполнение деталью заданных функций при эксплуатации изделия, связующие – необходимым образом ориентируют исполнительные поверхности в пространстве и ограничивают деталь как твердое тело.

Эксплуатационными свойствам (ЭС) как отдельных исполнительных поверхностей, так и деталей в целом принято называть их свойства, способствующие выполнению деталью заданных функций при заданном ресурсе и условиях эксплуатации. Правильно определенные при конструировании и технологически обеспеченные ЭС гарантируют высокое эксплуатационное качество деталей и машины в целом.

Возросшие требования к эксплуатационному качеству машин, продиктованные необходи-

мостью повышения конкурентоспособности последних, сделали актуальным изменение методологии технологического обеспечения ЭС.

Традиционная методология технологического обеспечения ЭС исходит из необходимости формирования технологических решений (ТР), гарантирующих достижение заданных значений производственно-технических показателей качества деталей, что и отождествляется с достижением заданных ЭС. Между тем показано, что ЭС исполнительных поверхностей и деталей в целом определяются не только достигнутыми значениями совокупности производственно-технических показателей их качества, но и тем, как эти значения были достигнуты [1]. Разные множества и последовательности технологических методов могут приводить к близким значениям производственно-технических показателей качества поверхностей или деталей, но к существенно разным ЭС.

Проблема обеспечения заданных ЭС изделий всегда была актуальной для машиностроения.

Отличительной особенностью традиционных подходов к определению и прогнозированию качества изготавливаемой машиностроительной продукции является использование принципа суперпозиции, согласно которому каждый из действующих технологических факторов действует независимо от других, а результат совместного действия определяется их парциальной суммой, представляемой в той или иной форме [2, 3]. Технологические системы многосвязны, объекты производства характеризуются нелинейностью, необратимостью и неравновесностью. Однако применение принципа суперпозиции сводит многосвязные взаимодействия, осуществляемые в технологических системах, к односвязным, игнорируя взаимное влияние технологических факторов [4]. Рост требований к качеству изготовления и ЭС элементов машин делает методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции, малоприменимыми, так как эффект взаимного влияния факторов соизмерим с результатами их прямого воздействия. Процесс изменения свойств изделий должен рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов, собственно изменения и сохранения свойств [5]. Сказанное нашло отражение в оригинальной концепции направленного формирования свойств изделий машиностроения [6].

1. Направленное формирование свойств изделий

Концепция направленного формирования свойств изделий (например, деталей) базируется на следующих основных положениях [5–8]:

- качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории и множество показателей качества детали является результатом предыстории;
- любое технологическое и связанное с ним воздействие на заготовку изменяет все показатели качества заготовки;
- любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества заготовки;
- качество детали формирует взаимодействующая с ней технологическая среда на каждом этапе производства.

Основная задача направленного формирования качества (свойств) детали: при известных начальных и конечных свойствах предмета производства определить оптимальную с точки зрения трансформации свойств технологическую среду. Трансформацию свойств предмета производства (на примере детали) предложено описывать моделью [5, 6]:

$$[K_i]_{j*} [K_i]_j = [S_i]_j \cdot [K_i]_{j-1} + [k_{il}] \cdot [K_i]_{j*}, \quad (1)$$

где $[K_i]_{j-1}$, $[K_i]_j$ – вектор-столбцы значений показателей качества предмета производства на $(j-1)$ и j этапах процесса изготовления детали соответственно; $[S_i]_j$ – матрица оперативной трансформации показателей качества предмета производства на j этапе процесса изготовления детали; $[k_{il}]$ – матрица взаимного влияния свойств предмета производства; $[K_i]_{j*}$ – вектор-столбец значений показателей качества предмета производства сформировавшихся до этапа j , но оказывающих влияние на показатели качества, формирующиеся на j этапе процесса изготовления детали.

Первое слагаемое в (1) характеризует влияние оперативной трансформации качества предмета производства (собственно технологического воздействия) на итоговое качество детали, второе – влияние технологической наследственности и взаимное влияние формирующихся свойств [6].

Доказано [6], что доля технологической наследственности и взаимного влияния формирующихся свойств в итоговых показателях качества детали составляет: при обеспечении точности размера поверхности по IT7 17...25 %, при обеспечении точности размера поверхности по IT3 до 40...50 %. Разработан математический аппарат детерминированного и статистического моделирования трансформации свойств изделий [9], позволяющий успешно применить предложенную концепцию при формировании ЭС изделий [10–12].

2. Направленное формирование эксплуатационных свойств изделий

Перспективно формирование ТР, гарантированно обеспечивающих явно заданные ЭС исполнительных поверхностей или детали в целом [12]. Однако реализация такого подхода сдерживается его недостаточной методической разработанностью.

Каждому ЭС может быть поставлен в соответствие параметр, количественно его характеризующий, например, износостойкость может характеризоваться интенсивностью изнашивания (относительным износом).

Условие обеспечения ЭС предмета производства может быть представлено в виде

$$\forall k = 1, K; P_k \geq [P_k] \text{ или } P_k \leq [P_k], \quad (2)$$

где P_k – значение параметра, характеризующего k -е ЭС, фактически достигнутое при изготовлении детали; $[P_k]$ – предельное значение того же параметра, заданное конструктором из обеспечения ресурса детали; k – число регламентируемых ЭС детали. Знак «больше» соответствует максимизируемым, «меньше» – минимизируемым значениям параметров.

Возможна оценка уровня обеспечения каждого из ЭС (U_k):

$$\begin{aligned} & \text{– при } P_k \rightarrow \max, U_k = \frac{P_k}{[P_k]}; \\ & \text{– при } P_k \rightarrow \min, U_k = \frac{[P_k]}{P_k}; \end{aligned} \quad (3)$$

Если $\forall k = 1, K; U_k \leq 1$ или $U_k \geq 1$, то уровень обеспечения всей совокупности ЭС детали (U):

$$U = \prod_{k=1}^K U_k. \quad (4)$$

Если для одной части ЭС $U_k \leq 1$, а для другой $U_k \geq 1$, то значение U недостаточно определенно характеризует общий уровень ЭС, поэтому более целесообразно оценивать уровень обеспечения каждого из выделенных ЭС в отдельности или одного из них (доминирующего свойства).

Гарантированному обеспечению ЭС детали соответствует $U > 1$, однако предел «гарантированности», характеризуемый оценкой уровня обеспечения, должен быть обоснованным.

Наиболее целесообразно, чтобы при проектировании машины ее элементы были гармонизированы с учетом ее класса по ресурсу эксплуатации. Однако это пожелание часто невыполнимо, о чем свидетельствует наличие практически в каждой машине «быстроизнашиваемых» деталей. Необходимый и достаточный уровень обеспечения хотя бы доминирующих ЭС может быть определен как условие гарантированного обеспечения ЭС при компромиссе технического и экономического принципов проектирования с учетом заданного ресурса и конкурентоспособности машины.

Проиллюстрируем сказанное примером обеспечения ЭС, для которого желательно, чтобы $P_k \rightarrow \max$. Предельное значение характеризующего его параметра $[P_k]_k$, заданное конструктором, соответствует надежно эксплуатирующейся детали. Конструктор, как правило, предусматривает и допустимый диапазон изменения (потери) значения параметра $[\Delta P_k]$. Расчетный ресурс (T_3) детали по рассматриваемому ЭС:

$$(T_3)_p = \frac{[\Delta P_k]}{v_p}, \quad (5)$$

где v_p – расчетная скорость потери работоспособности по рассматриваемому ЭС.

Значение $(U_k)_{\min}$ определяет минимальный предел уровня обеспечения данного ЭС, соответствующий штатной эксплуатации детали. Расчетный ресурс детали по данному ЭС будет не обеспечен, если фактическая скорость потери работоспособности будет выше расчетной, которую, даже приближенно, оценить при проектировании машины крайне затруднительно. Сказанное вызывает необходимость гарантированного обеспечения ЭС и установление его обоснованного предельного уровня.

Одним из наиболее очевидных путей обеспечения ЭС является поиск технологических методов, их последовательностей и сочетаний, а также ТР более высоких уровней, гарантированно обеспечивающих конкретные (ое) ЭС. Это требует экспериментальной проверки ЭС даже отдельных исполнительных поверхностей, изготовленных в результате реализации ТР. Необходима фиксация параметров ТР и условий эксплуатации контролируемых деталей, что позволит сформировать соответствующие банки данных, требующихся при формировании новых ТР.

В частности, ранжированные по эффективности и отсеleetированные последовательности технологических методов могут рассматриваться как информационная основа для синтеза маршрутных технологических процессов [13].

Элементарные маршрутные процессы изготовления основных (исполнительных) поверхностей в технологических процессах изготовления деталей реализуются не концентрированно в отдельных операциях, а в ряде из них, причем на разных этапах технологического процесса. Указанные элементарные процессы при этом дезинтегрируются и как отдельные операции (или даже переходы) встраиваются в общую структуру маршрутного технологического процесса. Возможно, что элементарный маршрутный процесс, гарантированно обеспечивающий ЭС при концентрированной реализации, не сможет обеспечить того же, будучи реализованным в маршрутном технологическом процессе изготовления детали как целостной системе, в частности из-за свойства эмерджентности в форме технологического наследования. При $U_k \leq 1$ это неизбежно приведет к уменьшению фактического ресурса детали.

Диапазон изменения параметра P_k , соответствующий гарантированному обеспечению ЭС $[P_k]_r$ можно оценить по формуле:

$$[\Delta P_k]_r = [\Delta P_k]_c + [\Delta P_k]_y, \quad (6)$$

где $[\Delta P_k]_c$ – изменение параметра P_k , компенсирующее эмерджентность технологического процесса как системы; $[\Delta P_k]_y$ – изменение параметра, определяемое желаемым уровнем конкурентоспособности машины.

Фактический ресурс детали $(T_3)_\phi$ по рассматриваемому ЭС:

$$(T_3)_p = \frac{[\Delta P_k] + [\Delta P_k]_c + [\Delta P_k]_y}{v_p}. \quad (7)$$

С достаточной для практических расчетов точностью можно принять [6]:

$$[\Delta P_3]_c = \alpha [\Delta P_k], \quad (8)$$

где α – коэффициент, учитывающий негативное действие эмерджентности технологического процесса как системы на формирование значения параметра, характеризующего ЭС:

$$(T_3)_\phi = (1 + \alpha)(T_3)_{\text{нф}} + \frac{[\Delta P_k]_y}{v_\phi}, \quad (9)$$

где $(T_3)_{\text{нф}}$ – фактический ресурс детали, определенный по номинально заданному запасу ЭС.

Дополнительные гарантии ЭС, характеризующиеся последним слагаемым в (9), удорожают изготовление детали и должны вводиться и обеспечиваться технологически лишь при необходимости.

В предположении конструктивного сходства изделий A и B сравним характеристики конкурентоспособности сходных деталей изделий A и B по соотношению «полезный эффект / затраты» [14]:

$$K_A = \frac{(T_3)_{\phi A}}{3_A}; K_B = \frac{(T_3)_{\phi B}}{3_B}, \quad (10)$$

где $(T_3)_{\phi A}$, $(T_3)_{\phi B}$ – фактические ресурсы соответствующих деталей изделий A и B ; 3_A , 3_B – затраты на изготовление и эксплуатацию деталей. При $[\Delta P_k]_{yA} = 0$ $K_B > K_A$, в противном случае можно добиться приближенного равенства K_A и K_B , или:

$$\frac{(T_3)_{\phi A}}{3_A} = \frac{(T_3)_{\phi B}}{3_B}; \quad (11)$$

$$(T_3)_{\phi A} = K_B 3_A.$$

Подставив (9) в (11), получим, что для поддержания конкурентоспособности изделия A необходимо:

$$\frac{[\Delta P_k]_{yA}}{V_{\phi A}} \geq K_B 3_A - (1 + \alpha)(T_3)_{\text{нф}A}. \quad (12)$$

При задании необходимых допущений из (12) можно определить значение $[\Delta P_k]_{yA}$, определяющее предел гарантированного обеспечения ЭС по (6).

Изложенный подход применим при оценивании и анализе результатов использования комбинированных методов обработки и проектировании технологических комплексов [15, 16]. Его формализованный характер обеспечит, в частности, рост преимуществ параллельного проектирования с использованием информационных технологий [17].

Выводы

1. Формируемые технологические решения должны гарантированно обеспечивать явно заданные эксплуатационные свойства деталей.
2. Необходимый и достаточный уровень гарантированного обеспечения эксплуатационных свойств должен быть ограничен и учитывать:
 - влияние эмерджентности технологического процесса как системы на результаты реализующихся в ней элементарных решений;
 - необходимость поддержки конкурентоспособности изделия.

Литература

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
3. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
4. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
5. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. – М.: МАИ, 2000. – 364 с.
6. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
7. Design decisions during modelling transfer of quality parameters in life cycle of machine details / M. Kheifetz [et al.] // Proceedings on the 11 International scientific conference on advanced production technologies. – Novi Sad, Serbia: University of Novi Sad, 2012. – P. 353–356.
8. Formation of quality parameters in life cycle of machine details on the basis of technological inheritance / A. Vasiliev [et al.] // Proceedings on the 11 International scientific conference on advanced production technologies. – Novi Sad, Serbia: University of Novi Sad, 2012. – P. 403–406.
9. Васильев, А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах / А.С. Васильев // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.

10. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Яцерицын, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко, А.С. Васильев // Докл. НАН Беларуси, 2005. – Т. 49, № 2. – С. 130–135.

11. Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упроченных поверхностей / А.С. Васильев, А.И. Кондаков, С.А. Клименко и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 32–36.

12. Кондаков, А.И. Технологические решения и гарантированное обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / А.И. Кондаков // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 3. – С. 17–20.

13. Кондаков, А.И. Формирование информационной основы проектирования маршрутных процессов изготовления деталей / А.И. Кондаков // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 3. – С. 15–20.

14. Кондаков, А.И. Количественные критерии жизненного цикла изделия машиностроения / А.И. Кондаков, А.В. Харитонов // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 1. – С. 5–9.

15. Analysis and design of highly efficient methods of treatment / M. Kheifetz [et al.] // Proceedings on the 34 International conference on production engineering. – Nis, Serbia: University of Nis, 2011. – P. 449–452.

16. Design of technological complexes for highly efficient treatment / V. Borodavko [at al.] // Proceedings on the 34 International conference on production engineering. – Nis, Serbia: University of Nis, 2011. – P. 453–456.

17. Manufacturing Technologies for Machines of the Future. – Berlin: Springer Verlag, 2003. – Chapter 16. – P. 461–513.

Васильев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, vas@bmstu.ru.

Поступила в редакцию 9 сентября 2016 г.

DOI: 10.14529/engin170104

DIRECTIONAL FORMATION OF OPERATIONAL PROPERTIES DETAILS IN TECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS

A.S. Vasiliev, vas@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The main task of machine production is assuring their operating quality, directly depending on components operating characteristics. Characteristics, assuring the components performing set functions under set operating conditions and assuring set components' life, are considered as operating characteristics of separate surfaces and whole components. The common method of engineering support of the operating characteristics is based on necessity of assuring certain engineering and manufacturing quality parameters during production based on the assumption that they warrant reaching set operating characteristics. It is already proved that different sets and sequences of process methods can lead to similar components quality engineering and manufacturing parameters, but to significantly different operating characteristics. The method of process design, based on superimposing process impact results on production subject, has run its course.

Suggested concept of controlled forming of goods (in particular, components) characteristics considers their reached quality as a result of transforming its separate parameters, taking into ac-

count operative impact on production object, as well, as succession and mutual influence of forming features. In order to describe the transformation a mathematical tool, allowing deterministic stochastic modeling of such transformation, was worked out. The present work includes using the concept for controlled forming of set operating characteristics of goods, using components as example. The perspective is to form technological solutions, 100% assuring directly set operating characteristics of operating surfaces or the whole component.

It is demonstrated that the necessary and sufficient level of warranted assuring set operating characteristics should be limited and should take into account influence of the emergence of the technological process as a system on results of the elementary solutions, performed in such system.

Keywords: technology, component, operating characteristic, forming, assuring, directivity.

References

1. Suslov A.G., Fedorov V.P. *Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Technological Assuring and Enhancing Operating Characteristics of Components and Their Unions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 448 p.
2. Kolesnikov K.S., Balandin G.F., Dal'ski A.M. *Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva mashin* [Technological Basis of Assuring Machines Quality]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 256 p.
3. Kuznetsov N.D., Tseitlin V.I., Volkov V.I. *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detaley mashin*. [Technological Methods of Enhancing Machines Components Reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 304 p.
4. Vasiliev A.S., Dal'ski A.M., Klimenko S.A. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom mashin* [Technological Basis of the Machines Quality Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p.
5. Dal'ski A.M., Bazrov B.M., Vasil'ev A.S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proizvodstve*. [Technological Inheritance in Machine Building Production]. Moscow, MAI Publ., 2000. 364 p.
6. Vasiliev A.S., Dal'ski A.M., Zolotarevski Yu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoystv izdeliy mashinostroeniya* [Controlled Forming of Machine Building Goods Features Forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 352 p.
7. Kheifetz M. Design Decisions During Modeling Transfer of Quality Parameters in Life Cycle of Machine Details. *Proceedings on the 11 International Scientific Conference on Advanced Production Technologies*. Novi Sad, Serbia, 2012, pp. 353–356.
8. Vasil'ev A. Formation of Quality Parameters in Life Cycle of Machine Details on the Basis of Technological Inheritance. *Proceedings on the 11 International Scientific Conference on Advanced Production Technologies*, Novi Sad Serbia, 2012, pp. 403–406.
9. Vasiliev A.S. [Statistic Model of Transforming Goods Characteristics in Technological Environments]. *MSTU Bulletin: Machine Construction*, 1997, no. 4, pp. 13–20. (in Russ.)
10. Yashcheritsin P.I., Kheifets M.L., Klimenko S.A., Vasiliev A.S. [Technological and Operational Heritage of Quality Parameters in Machine Building Industry Products Life Cycles]. *Report of NAS of Belorussia*, 2005, no. 49, pp. 130–135. (in Russ.)
11. Vasiliev A.S., Kondakov A.I., Klimenko S.A., Kheifets M.L., Gaiko V.A. [Technological Control over Heritage of the Operational Characteristics of the Hardened Surfaces Quality]. *Hardening Methods and Covers*, 2011, no. 1, pp. 32–36. (in Russ.)
12. Kondakov A.I. [Technological Solutions and Warranted Assuring of Machines Components Operating Characteristics]. *Reference Book. Engineering Magazine*, 2009, no. 3, pp. 17–20. (in Russ.)
13. Kondakov A.I. [Forming Innovative Basis for Designing Routed Processes of Components Production]. *Reference Book. Engineering Magazine*, 2001, no. 3, pp. 15–20. (in Russ.)
14. Kondakov A.I., Kharitonov A.V. [Quantitative Criteria of the Machine Building Industry Product Life Cycle]. *Reference Book. Engineering Magazine*, 2004, no. 1, pp. 5–9. (in Russ.)

15. Kheifetz M. Analysis and Design of Highly Efficient Methods of Treatment. *Proceedings on the 34 International Conference on Production Engineering*. Nis Serbia, 2011, pp. 449–452.
16. Borodavko V. Design of Technological Complexes for Highly Efficient Treatment. *Proceedings on the 34 International Conference on Production Engineering*. Nis Serbia, 2011, pp. 453–456.
17. Manufacturing Technologies for Machines of the Future, Springer, Verlag. Berlin, 2003. Chapter 16, pp. 461–513.

Received 9 September 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Васильев, А.С. Направленное формирование эксплуатационных свойств деталей в технологических средах / А.С. Васильев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 33–40. DOI: 10.14529/engin170104

FOR CITATION

Vasiliev A.S. Directional Formation of Operational Properties Details in Technological Environments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 33–40. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170104
