

# Автоматизация и Современные Технологии

---

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор  
В.Л. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ:  
Бучаченко А.Л.  
Гусев А.А.  
Дегтярев Ю.И.  
Елисеев В.А.  
Иванов А.П.  
Мальцева С.В.  
Нефедов Е.И.  
Шебалин И.Ю.  
(заместитель главного редактора)

5  
—  
2013

УЧРЕДИТЕЛИ:  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ  
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

---

Журнал зарегистрирован 9 апреля  
1999 г. за № 018684 в Комитете  
Российской Федерации по печати

---

Журнал входит в перечень  
утверждённых ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей  
учёных степеней

---

ООО «Издательство Машиностроение»

РЕДАКЦИЯ:

Шебалин И.Ю. — зам. главного редактора  
Осипова В.Г. — научный редактор  
Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 748 0290,  
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 268 3858,  
факс: (499) 269 4897

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ

#### НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Мамедов Ф.И., Дадашева Р.Б., Гусейнов Р.А., Юсифов Р.А. Применение наноматериалов в устройствах вибровозбудителей низких механических колебаний .....	3
Гданский Н.И., Карпов А.В., Гданская Ю.А. Прогнозирование моделирования внешней нагрузки электромеханического привода .....	7
Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Ультразвуковая гидродинамическая очистка поверхностей изделий .....	11

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Капля Е.В. Система финитного управления приводами лопастей ветроэнергетической установки .....	13
Сердобинцев С.П., Ханевич В.С. Метод упорядочивания многокритериальных альтернатив для управления распределением рыбного сырья .....	18
Шеков И.С., Янишевская А.Г. Алгоритм взаимодействия программного комплекса для автоматического проектирования технологических процессов и производств в машиностроении .....	22
Дударев А.С. Методы предотвращения поломок мелко-размерного режущего инструмента при формообразовании отверстий в сэндвичевых конструкциях из полимерных композиционных материалов .....	27
Чижиков В.И. Проектирование упругого кинематического соединения бесшарнирного манипулятора для технологических операций в экранированной среде .....	32

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Лавреш И.И. Самоорганизация объектов управления и мера согласования интересов субъекта и объекта управления на основе матричного метода .....	41
---	----

### ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

«ПРОДЭКСПО-2013» .....	46
------------------------	----

### ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов .....	47
-----------------------------	----

**Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу: (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 6600, 269 5298**

Сдано в набор 28.02.13. Подписано в печать 26.04.13.  
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Mamedov F.I., Dadacheva R.B., Guseynov R.A., Yusifov R.A. The use of nanomaterials in the vibration exciters of the low mechanical oscillations .....	3
Gdanskiy N.I., Karpov A.V., Gdanskaya Yu.A. Modeling prediction of the external load for the electromechanical drive ...	7
Dyakov I.F., Moiseev Yu.V. Ultrasonic hydrodynamic cleaning of the articles surface .....	11

### MODERN TECHNOLOGIES

Kaplya E.V. Finite control system of the windmill blades drives .....	13
Serdobintsev S.P., Khanovich V.S. Multicriterion alternatives ordering method for fish raw materials distribution management .....	18
Shekov I.S., Yanishevskay A.G. Program complex interaction algorithm for automatic projecting of the technological processes and machine-building production .....	22
Dudarev A.S. Damage prevention methods of the small-sized cutting tool for holes shaping in sandwich structures of polymer composites .....	27
Chizhikov V.I. Design of the elastic kinematical connection for the hingeless manipulator for technological operations in the screened environment .....	32

### ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC AKTIVIES

Lavresh I.I. Management objects self-organization and the interest coordination measure of management subject and object from the matrix method .....	41
---	----

### EXHIBITION AND PRESENTATIONS

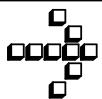
«PRODEXPO-2013».....	46
----------------------	----

### SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review .....	47
--------------------------	----

**Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.**  
**За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель**

Отпечатано в ООО «Белый ветер»  
115407, Москва, Нагатинская наб., 54



УДК 10432

**Ф.И. Мамедов, д-р техн. наук, проф., Р.Б. Дадашева, канд. техн. наук, доц.,****Р.А. Гусейнов, канд. техн. наук, доц., Р.А. Юсифов**

(Сумгайитский государственный университет, Республика Азербайджан)

Shafa0977@gmail.com

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НИЗКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

*Рассмотрен вопрос повышения технико-экономических показателей вибровозбудителей низких механических колебаний. Проведены исследования и дано сравнение материалов магнитопроводов, изготовленных из шихтованных электротехнических и конструкционных сталей. На основе составленной магнитной системы установлены потери мощности от вихревых токов.*

*В результате исследований установлено, что при применении в качестве наноматериала конструкционной стали значительно уменьшается масса магнитопровода, упрощается конструкция и технология изготовления, минимизируются затраты и повышаются технико-экономические показатели вибровозбудителя низких механических вибраций.*

**Ключевые слова:** наноматериалы, вибровозбудители низких механических колебаний.

*The question of the technical and economic performance increasing of the low mechanical vibration excitors is considered. Studies are carried out and a comparison of the magnetic materials made from blended electrical and constructional steels is submitted. Power loss from eddy currents is determined from a submitted magnetic system.*

*As a studies result is determined that when constructional steel is used as nanomaterial magnetic conductor mass significantly reduces, design and manufacturing technology become simpler, costs minimizes and the technical and economic activities of the vibration excitors of the low mechanical oscillations raises.*

**Key words:** nanomaterials, vibration excitors of the low mechanical oscillations.

Согласно оценкам отраслевых экспертов-аналитиков, перспективное применение нанотехнологий в различных областях промышленности в ближайшее время составит 21 % [1].

Основные исследования в данной сфере сконцентрированы на решении задач повышения плотности энергетического потока, снижении стоимости и уменьшении габаритов датчика массы и повышении надёжности.

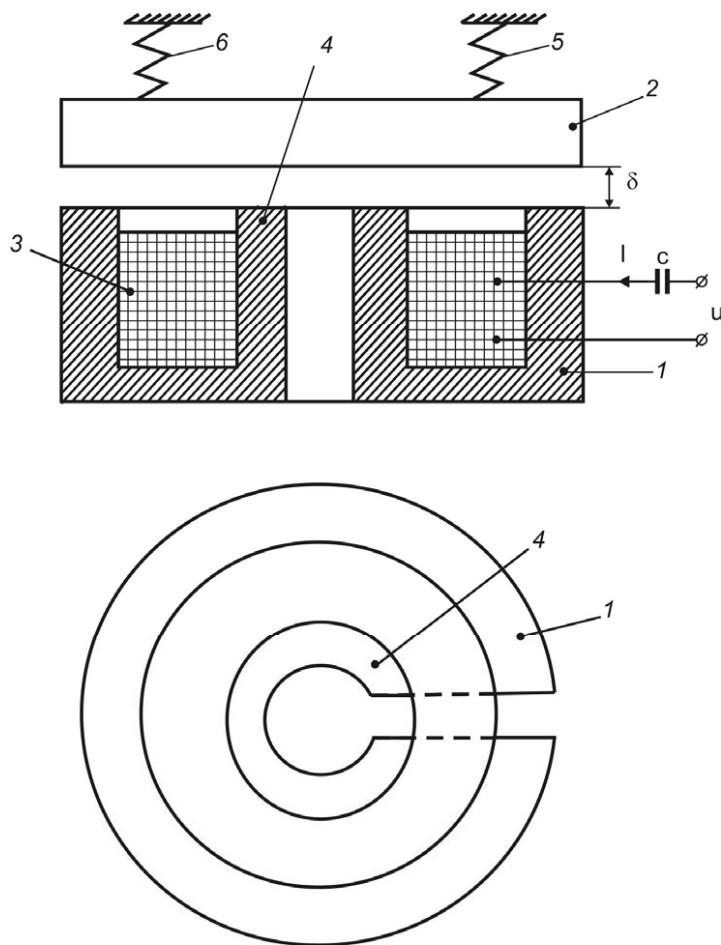
По мнению учёных, фундаментальные исследования в области нанотехнологий соответствуют мировому уровню, но примеров практического внедрения и массовых коммерческих продуктов очень мало. Среди проектов найдутся единичные примеры успешного внедрения. Однако большинство разработок демонстрируют хороший коммерческий потенциал и, будучи внедрёнными в массовое производство, способны стать основой для конкурентоспособной научноёмкой промышленности.

Устройства вибровозбудителя обычно изготавливают из магнитопровода из шихтованной лис-

товой электротехнической стали [2]. Как видно из рис. 1, магнитная система состоит из Ш-образных частей неподвижного магнитопровода 1, подвижного магнитопровода 2, системы обмотки 3, намотанной на среднем выступе 4, противодействующих пружин 5 и 6.

Такие вибровозбудители обладают сложной технологией изготовления магнитопроводов из листовой электротехнической стали, толщина которой  $(0,2\text{--}1,0)\cdot10^{-3}$  м.

Кроме того, существующие вибровозбудители обладают следующими недостатками: для каждой формы магнитной системы вибровозбудителя требуется штамповнная установка, снабжённая специальными прессформами; требуется набор магнитопровода из штампованных листов нужной толщины с учётом одностороннего лакирования заделки закрепления подвижных и неподвижных частей, а также проведение дополнительной обработки с последующим монтажом магнитопроводов к основанию; применение шихтованных электротехнических сталей не обеспечивает



**Рис. 1. Магнитная система вибровозбудителя с последовательным конденсатором**

идентичности рабочих характеристик при их серийном выпуске, и, соответственно, требуется обеспечить необходимые основные и дополнительные погрешности монтажа конструкции.

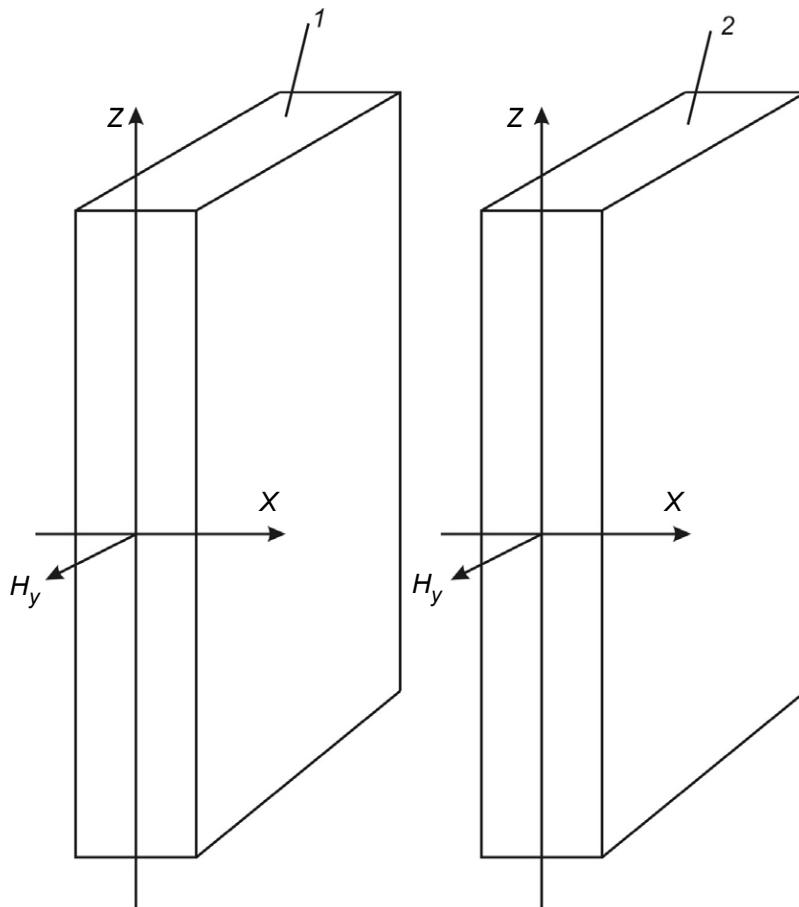
Температурный коэффициент листовой электротехнической стали меняется в большом диапазоне, что вызывает трудности при обеспечении стабильности характеристики. Это связано с тем, что магнитная проницаемость материала магнитопровода весьма нестабильна. Она изменяется в зависимости от содержания углерода в стали, которое практически (для таких материалов) меняется от 0 до 0,2 %. Учитывая изложенное выше, необходимо выбрать наноматериалы в качестве ферромагнитных материалов магнитопроводов, что приводит к стабильности его электромагнитных параметров независимо от режимов изготовления на производстве и других воздействующих факторов. Анализ диапазона изменения углерода в отдельных марках конструкционных сталей показывает, что содержание углерода изменяется в небольших диапазонах. Так, изменение для стали 20 составляет 0,07, стали 55 – 0,09, стали 10, 30,

40, 60, 70, 80 – (1–1,2) %. При этом магнитная проницаемость для таких сталей не превышает 7–8 %. Также проведён анализ и других марок стали как инструментальных, так и легированных.

В результате исследований установлено, что в легированных сталях содержание углерода меняется и, соответственно, магнитная проницаемость в 1,5–3 раза больше, чем в конструкционной стали. Выполнение магнитопроводов вибровозбудителей из сплошной конструкционной стали, с одной стороны, позволяет стабилизировать электромагнитные параметры, а с другой стороны, значительно упростить конструкцию и технологию изготовления.

Таким образом, конструкционные стали более полно отвечают всем требованиям, предъявляемым к материалу магнитопровода вибровозбудителя низких механических колебаний.

При создании однофазного вибровозбудителя со сплошным магнитопроводом необходимо выбрать форму магнитной системы, обеспечивающей нужную характеристику и минимальные потери мощности [3].



**Рис. 2. Магнитные поля в сталях:**  
1 – электротехнической; 2 – конструкционной

Для этого необходимо определить условия замены магнитопровода из листовой электротехнической стали на сталь со сплошной структурой конструкционных марок, что является наноматериалом. Эти условия определяются из равенства потерь в электротехнической и сплошной конструкционной стали. Принимаем, что в идентичных магнитных полях в обоих листах сталей магнитные силовые линии направлены перпендикулярно сечению листа по направлению оси  $Y$  (рис. 2). При этом в каждом произвольном поперечном сечении магнитопровода напряжённость магнитного поля имеет только одну составляющую. При таком условии уравнение электромагнитного поля в его поперечном сечении записывается в виде дифференциального уравнения второго порядка с частными производными, учитывающими зависимость  $H_y$  от переменных  $X$  и  $Z$ .

Так как толщина каждого листа намного меньше его ширины, то величина  $H_y$  практически не зависит от переменной  $Z$ . С учётом этого уравнения в каждом листе можно представить полными дифференциальными уравнениями,

позволяющими определить зависимости  $H_y$  от  $X$ . Решением полученного уравнения находят удельные объёмные потери мощности в листе от вихревых токов. В процессе исследования приняты параметры поля с индексом «Э» для электротехнической стали и конструкционной стали с индексом «К».

Приравнивая удельные мощности, полученные в отдельных листах, установлена функциональная связь между параметрами электротехнической и сплошной конструкционной сталью, которая имеет вид

$$a_k = a_\vartheta \sqrt{\left(\frac{\mu_\vartheta}{\mu_k}\right)^2 \frac{\rho_\vartheta}{\rho_k}},$$

где  $a_\vartheta$ ,  $a_k$  – толщина листов из электротехнической и конструкционной стали;  $\mu_\vartheta$ ,  $\mu_k$  – относительные магнитные проницаемости материалов из электротехнической и конструкционной стали;  $\rho_\vartheta$ ,  $\rho_k$  – удельное сопротивление материала из электротехнической и конструкционной стали.

При уменьшении толщины листов из электротехнической стали усложняется технология изготовления магнитопровода. Однако при изготовлении Ш-образного и других форм магнитопроводов из конструкционной стали такого не наблюдается. При изготовлении Ш-образного цилиндрического магнитопровода сопротивление, оказанное вихревым токам, уменьшается и увеличиваются потери мощности.

При продольном вырезе цилиндра магнитопровода по его толщине сопротивление вихревых токов увеличивается, потери мощности уменьшаются.

В дальнейшем повышение мощности суммарных вихревых токов возможно уменьшением длины магнитного потока, что позволит уменьшить массу магнитопровода, упростить конструкцию и технологию изготовления, минимизировать затраты, повысить технико-экономические показатели.

Таким образом, стоимость магнитопроводов разработанных вибрационных устройств из конструкционных сталей 10, 45 и т. д. более чем в 3 раза ниже стоимости используемых обычно магнитопроводов из электротехнических сталей.

Использование конструкционной стали позволяет также стабилизировать напряжение в больших частотных диапазонах вибровозбудителей.

Следовательно, применение сплошной конструкционной стали в качестве наноматериала повышает технико-экономические показатели вибровозбудителей низких механических колебаний.

#### **Библиографические ссылки**

1. Нанотехнологии для энергетики // В мире наноинтернета. 2011. № 1. С. 2–8.

2. Белобов Е.М., Васильев В.А., Громков Н.В. Минимизация влияния температур на тонкоплёночныеnano- и микроэлектромеханические системы и датчики давления на их основе // Измерительная техника. 2009. № 8. С. 91–94.

3. Повышение технико-экономических показателей датчика малых перемещений с использованием нанопродуктов. Научные исследования современности / Ф.И. Мамедов, Р.Б. Дадашева, А.А. Юсифов, Ш.Т. Мамедова, К.Ф. Асадова: сб. науч. тр. По материалам междунар. науч.-практич. конф. Вып. 3. Киев: 2011. С. 7–12.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ**

## **ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

**Ю.И. Головин**



2012 г. Объем 656 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-662-8 Цена 800 р.

Изложены физико-химические основы нанотехнологии. Особенное внимание удалено размерным эффектам различной природы и путям их практического использования в различныхnanoструктурах и изделиях. Рассмотрены современные методы получения, исследования и определение свойств наноматериалов. Систематизированы и описаны основные направления развития нанотехнологий и нанотехники: физическое наноматериаловедение и наномеханика, наноэлектроника и нанобиотехнологии.

Наряду с общими положениями приведено большое число примеров конкретных разработок, доведенных до промышленного производства. Автор использовал как литературные, так и собственные данные. Книга содержит обширный ссылочный аппарат, включающий зарубежные и отечественные источники.

Для инженерно-технических работников, осваивающих и использующих нанотехнологические процессы, а также может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в этой области.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)

УДК 681.511.22

**Н.И. Гданский**, д-р техн. наук, проф. (Российский государственный социальный университет),  
**А.В. Карпов**, канд. техн. наук, доц., **Ю.А. Гданская**, канд. техн. наук  
(Московский государственный университет инженерной экологии)

al-kp@mail.ru

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

*Предложен метод моделирования внешней нагрузки, действующей на привод, на основе данных о его перемещении и работе, затрачиваемой двигателем. Рассмотрены общие вопросы построения моделей данного вида.*

**Ключевые слова:** моделирование внешней нагрузки, привод.

*The modeling method of the external load acting on the drive, from dates about the movement and the work expended by the engine is proposed. The general problems of the given type models constructing are considered.*

**Key words:** external load modeling, drive.

При автоматическом управлении в технических системах возникают задачи, связанные с обеспечением заданных координат и траекторий перемещения рабочих органов. В современных системах управления динамика объекта часто неизвестна, регулируемые процессы не являются независимыми, измерения в той или иной мере зашумлены.

Сравнительно новым методом управления техническими объектами является управление на основе прогнозирования [1, 2]. Рассмотрим его применение для управления электромеханическим приводом вращательного движения.

В качестве упрощённой модели привода принят рабочий вал, к которому с одной стороны приложен обобщённый приведённый момент сил сопротивления  $M$ , а с другой – приведённый момент движущих сил  $M_d$ . Вал снабжён датчиком углового перемещения, регистрирующим дискретные значения угла поворота вала  $\phi_i^u$ . Соответствующие моменты времени  $t_i^u$  регистрируются управляющей системой. Измеренные узловые точки функции  $\phi(t)$  перемещения вала с координатами  $t_i^u$  и  $\phi_i^u$  обозначим через  $\bar{P}_i^u$ . Для дальнейших расчётов полученные данные  $t_i^u$  и  $\phi_i^u$  слаживаются для устранения высокочастотных шумов. Узловые точки функции  $\phi(t)$  со слаженными координатами  $t_i^u$  и  $\phi_i^u$  обозначим через  $\bar{P}_i$  (см. рисунок).

Приведённый к рабочему валу момент движущих сил  $M_d$  обусловлен только действием двигателя. Работа, совершаемая им за промежуток времени  $t_i; t_{i+1}$ , записется в виде

$$A_{di} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} U(t) I(t) \eta_d(t) dt,$$

где  $U(t)$  – напряжение питания двигателя;  $I(t)$  – сила тока в цепи питания двигателя;  $\eta_d(t)$  – КПД двигателя.

Приведённый момент сил сопротивления  $M$  обусловлен действием на рабочий вал и связанные с ним детали сил различной природы. Работа сил сопротивления на промежутке времени  $t_i; t_{i+1}$  равна интегралу на соответствующем отрезке изменения угла поворота вала  $\phi_i; \phi_{i+1}$ :

$$A_{ci} = \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} M(\phi) d\phi. \quad (1)$$

Так как изменение процессов обычно рассматривают по времени, то, используя инвариантность формы первого дифференциала  $d\phi = \frac{d\phi}{dt} dt$ , с учётом  $d\phi/dt = \dot{\phi}(t)$ , получим формулу (1) в следующем виде:

$$A(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} M(\phi(t)) \dot{\phi}(t) dt. \quad (2)$$

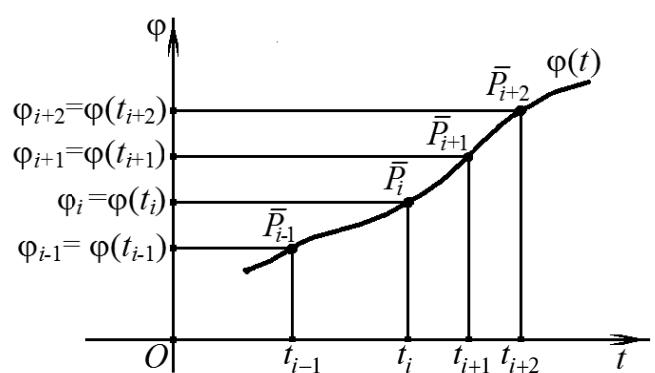


График функции  $\phi(t)$  перемещения вала 16

Пренебрегая потерями механической энергии в системе, полагаем, что работа движущих сил  $A_{di}$  за отрезок времени  $t_i; t_{i+1}$  равна работе сил сопротивления  $A_{ci}$ :

$$A_{di} = A_{ci}.$$

Приведённый момент сил сопротивления  $M$ , с одной стороны, содержит составляющие, изменяющиеся только по времени  $t$  и не связанные с законом движения вала  $\phi(t)$ , а с другой – зависит от  $\phi(t)$  (вязкое трение, инерционные нагрузки и др.):

$$M = M(t, \phi(t)).$$

Изменение значений функции обычно характеризуется её производными. Поэтому в качестве модели внешней нагрузки принят вектор  $\bar{M}^k$  из постоянных величин, имеющих физический смысл усреднённых значений частных производных от  $M$  по параметрам  $t$  и  $\phi$ , характеризующих построенную на основе прогнозирования модель внешней нагрузки. Индекс  $k$  означает порядок модели, т. е. максимальный порядок производных, использованных в модели. При фиксированных значениях компонент модели  $\bar{M}^k$  и переменных кинематических параметрах движения мгновенную величину  $M(t, \phi(t))$  можно представить в виде скалярного произведения:

$$M(t, \phi(t)) = (\bar{M}^k, \bar{\phi}^k(t)), \quad (3)$$

где  $\bar{\phi}^k(t)$  – вектор кинематических характеристик модели  $\bar{M}^k$ .

При таком представлении внешней нагрузки для расчёта управляющего воздействия на отрезке времени  $t_i; t_{i+1}$  в системе управления принята работа  $A$ , которую должен совершать двигатель. С учётом формул (2) и (3) работа  $A$  запишется в виде

$$A_i(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\bar{M}^k, \bar{\phi}^k(t)) \phi'(t) dt.$$

**Общий метод построения моделей нагрузки.** Разработан общий алгоритм расчёта коэффициентов модели  $\bar{M}^k$ , который включает следующие шаги:

**Шаг 1.** Совместное сглаживание измеренных входных данных  $\{\bar{P}_i^u = (t_i^u; \phi_i^u)\}$  и  $\{A_i^u\}$ . В результате в получаемых сглаженных значениях  $\{\bar{P}_i^u = (t_i^u; \phi_i^u)\}$  и  $\{A_i^u\}$  частично устраняются высокочастотные шумы.

**Шаг 2.** Интерполирование траектории движения вала по её сглаженным узловым точкам  $\{\bar{P}_i = (t_i; \phi_i)\}$ . Поскольку в вектор  $\bar{\phi}^k$  модели  $\bar{M}^k$  ( $k > 0$ ) входят производные  $d^s \phi / dt^s$  при изменении  $s$  от 1 до  $k$ , то для расчёта коэффициентов модели  $\bar{M}^k$  при  $k > 1$  необходимо построение непрерывной кривой  $\phi(t)$  гладкости ( $k-1$ ), проходящей через узловые точки  $\{\bar{P}_i = (t_i; \phi_i)\}$ .

**Шаг 3.** По сглаженным значениям  $\{\bar{P}_i = (t_i; \phi_i)\}$  и  $\{A_i\}$  с учётом интерполирующей кривой  $\phi(t)$  выполняется расчёт совокупности коэффициентов  $\{M_i^k\}_j$  модели  $\bar{M}^k$  на скользящих наборах подряд стоящих участков траектории (индекс  $j$  задаёт номер начального участка набора).

**Шаг 4.** Финишная фильтрация коэффициентов модели  $\bar{M}^k$ . Для получения усреднённых значений коэффициентов модели  $\bar{M}^k$  должна выполняться низкочастотная фильтрация (сглаживание) вычисленной совокупности коэффициентов  $\{M_i^k\}_j$ .

Для практической реализации общего алгоритма необходимо предварительное решение ряда частных задач.

**Совместная фильтрация моментов времени и работы, совершённой двигателем.** При использовании инкрементных энкодеров углы поворота, кратные некоторому постоянному для данного энкодера угловому шагу поворота вала  $h$ , преобразуются в дискретные выходные импульсные сигналы. Введя переменную  $\psi = (\phi - \phi_0)/h$  с целыми значениями измеряемых углов, перейдём от вещественных углов поворота  $\{\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n\}$  к дискретному набору значений  $\{\psi_0 = 0, \psi_1 = (\pm)1, \dots, \psi_n = \pm n\}$ . Также введём относительное время  $\tau_i = t_i - t_0$ . В этом случае полученные по результатам измерений узловые точки  $\bar{P}_i^u = (t_i^u; \phi_i^u)$ , ( $i = 0, \dots, n$ ) имеют в системе  $(\tau, \psi)$  координаты  $\bar{R}_i^u = (\tau_i^u; \pm i)$  и образуют равномерную сетку по углу  $\psi$ .

Обычно в теории рассматриваются сигналы с равномерно изменяющимся аргументом. Для сохранения равномерной сетки по углу  $\psi$  необходимо применять специальные алгоритмы. Коррекция положения координат узловых точек по оси  $\tau$  приводит к необходимости согласованного изменения значений работ  $\{A_i^u\}$  на соответствующих отрезках. Предположим, что распределение работ  $A_i^u$  ( $i = 0, 1, \dots, n-1$ ) близко к равномерному на соответствующих отрезках времени  $[\tau_i^u; \tau_{i+1}^u]$ . Введем дополнительное условие постоянства суммарной работы, выполненной двигателем на совокупности участков времени  $\{\tau_i^u; \tau_{i+1}^u\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1\}$ .

Основная идея алгоритма совместной фильтрации моментов времени и работ заключается в последовательной коррекции положений моментов времени  $\tau_i^u$  и  $\tau_{i+1}^u$ , пересчёте длин отрезков между ними и значений работ на этих отрезках.

**Финишное усреднение расчётных значений коэффициентов.** По вычисленным совокупностям коэффициентов  $\{M_i^k\}_j$  должна выполняться фильтрация (усреднение), при которой получаемые значения коэффициентов заданной модели  $\bar{M}^k = (\bar{m}_1^k, \dots, \bar{m}_p^k)$  будут наиболее близки к истинным.

При использовании координат  $(n+1)$  слаженных точек  $\bar{R}_i = (\tau_i, i)$ , ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) на расчётом участке соответствующей интерполирующей кривой  $\phi(\tau)$  расчёт коэффициентов модели  $\bar{M}^k$  может быть выполнен на максимальном  $(n-p+1)$  числе наборов скользящих подряд расположенных участков. При расчёте коэффициентов модели  $\bar{M}^k$  на каждой совокупности отрезков, которую обозначим  $S_j$  ( $0 \leq j \leq n-p$ ), состоящей из участков  $\{\bar{R}_j; \bar{R}_{j+1}\} - [\bar{R}_{j+p-1}; \bar{R}_{j+p}\}$ , возможны две ситуации:

на отрезке  $S_j$  модель  $\bar{M}^k$  существует, коэффициенты определены и рассчитаны (обозначим их  $M_j^k$ );

модель  $\bar{M}^k$  на отрезке  $S_j$  не определена, множество её коэффициентов пусто ( $M_j^k = \emptyset$ ).

В качестве основного весового коэффициента  $M_j^k$  модели принята суммарная длина  $l_{\Sigma j}$  всех отрезков  $S_j$ . Так как при слаживании входных данных крайние точки  $\bar{R}_0^u$  и  $\bar{R}_n^u$  не преобразуются, то крайние совокупности отрезков при  $j = 0$  ( $S_0$ ) и  $j = n-p$  ( $S_{n-p}$ ) предложено отбрасывать.

**Алгоритм усреднения коэффициентов  $\bar{M}^k$  модели при заданном законе распределения весовых коэффициентов.**

**Шаг 1.** Исходя из положения текущей совокупности отрезков  $S_j$  ( $1 \leq j \leq n-p-1$ ) и результатов построения модели на ней, рассчитываются значения дополнительного весового коэффициента, который обозначим  $C_j$ :

$$C_j = \begin{cases} k(j); & \text{модель на совокупности } \\ & j \text{ определена;} \\ 0; & \text{модель на совокупности } \\ & j \text{ не определена,} \end{cases}$$

где  $1 \leq j \leq n-p-1$ ;  $k(j)$  – функция, задающая закон распределения весовых коэффициентов, по которому осуществляется усреднение.

**Шаг 2.** Оценивается успешность построения значений коэффициентов  $\bar{M}_j^k$  модели проверкой условия:

$$\begin{aligned} S_k &= \sum_{j=1}^{n-p-1} C_j (\tau_{j+p} - \tau_j) \geq \\ &\geq 0,5 \sum_{j=1}^{n-p-1} k(j) (\tau_{j+p} - \tau_j) = 0,5 S_{k(\max)}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $S_{k(\max)}$  – величина, равная максимально возможной (при всех  $C_j = k(j)$ ) сумме значений коэф-

фициентов  $\bar{M}_j^k$  на всех совокупностях отрезков  $S_j$  ( $1 \leq j \leq n-p-1$ ).

**Шаг 3.** Если условие (4) не выполнено, то считаем, что по полученным данным модель  $\bar{M}^k$  не может быть построена и необходимо понизить порядок модели  $k$  или использовать другие алгоритмы управления. Если же условие (4) выполнено, то искомые усреднённые коэффициенты модели рассчитываем по формуле

$$\begin{aligned} m_r^k &= \sum_{j=1}^{n-p-1} C_j (\tau_{j+p} - \tau_j) m_r^k / \\ &/ \sum_{j=1}^{n-p-1} C_j (\tau_{j+p} - \tau_j); \quad 1 \leq r \leq p. \end{aligned}$$

Рассмотрены аналоги следующих законов усреднения, которые характеризуются соответствующими функциями  $k(j)$ :

равномерное усреднение  $k_1(j) = 1$ ;

линейное усреднение с максимумом в конце расчёного участка  $k_2(j) = j$ ;

линейное усреднение с максимумом в середине расчёного участка  $k_3(j) = 0,5(n-p)-|0,5(n-p)-j|$ ;

синусное усреднение с максимумом в середине расчёного участка  $k_4(j) = \sin(\pi j/(n-p))$ ;

синусное усреднение с максимумом на правом краю расчёного участка  $k_5(j) = \sin(0,5\pi j/(n-p))$ ;

линейно-синусное (смешанное) усреднение с максимумом в середине расчёного участка ( $u(j) = 1 - |1 - 2j/(n-p)|$ ,  $k_6(j) = u(j) - \sin(2\pi u(j))/(2\pi)$ ).

**Исследование качественных характеристик методов расчёта моделей  $\bar{M}^k$ .** Для оценки качественных показателей методов усреднения коэффициентов моделей  $\bar{M}^k$  в системах управления с инкрементным способом измерения углов поворота вала предложено производить их численное моделирование при

дискретном наборе значений угла поворота  $\{0, 1, \dots, 15\}$ ;

множестве эталонных кривых  $\{\phi_q(t)\}$ , воспроизводящих характерные перемещения вала;

наборе законов усреднения, задаваемых своими функциями распределений весовых коэффициентов  $k_z(j)$  ( $1 \leq z \leq 6$ ).

В качестве эталонных рассмотрено восемь кривых: 1)  $\psi_{(1)}(\tau) = \tau^1$ ; 2)  $\psi_{(2)}(\tau) = \tau^2$ ; 3)  $\psi_{(3)}(\tau) = \tau^3$ ; 4)  $\psi_{(4)}(\tau) = \tau^4$ ; 5)  $\psi_{(5)}(\tau) = \sqrt{\tau}$ ; 6)  $\psi_{(6)}(\tau) = \sqrt[3]{\tau}$ ; 7)  $\psi_{(7)}(\tau) = \sqrt[4]{\tau}$ ; 8)  $\psi_{(8)}(\tau) = \tau^2(8-\tau/3)/45$ ;  $\psi_{(8)}'(\tau) = (16-\tau)/45$ .

Алгоритм оценки качества построения модели  $\bar{M}^k$  и определения оптимального метода финишного усреднения значений её коэффициентов имеет вид

1. Для модели  $\bar{M}^k$  априори задаются точные значения коэффициентов:

$$\bar{M}_m^k = (m_{1m}^k, \dots, m_{pm}^k). \quad (5)$$

2. По заданным теоретическим коэффициентам  $\bar{M}_m^k$  модели и производным  $d^s \Phi_q(\tau) / d\tau^s$  ( $s = 1, \dots, k$ ) эталонной кривой  $\Phi_q(\tau)$  определяем первообразные интеграла работ по формуле (1), а на отрезках  $[0; 1], \dots, [14; 15]$  рассчитываем значения работ:

$$A_{mq}^k(\tau) = \int (\bar{M}_m^k, \bar{\Phi}_q^k(\tau)) \Phi'_q(\tau) d\tau;$$

$$\delta A_{mqi}^k = A_{mq}^k(\tau_{i+1}) - A_{mq}^k(\tau_i), \quad i = 0, \dots, 14. \quad (6)$$

3. По известным точкам  $R_{qi} = (\tau_i, i)$  ( $i = 0, 1, \dots, 15$ ) эталонных кривых  $\Phi_q(\tau)$  и значениям работ на отрезках  $\{\delta A_{mqi}^k, i = 0, \dots, 14\}$  на скользящих совокупностях отрезков  $S_j$  рассчитываем по алгоритму построения модели значения её коэффициентов  $\{\bar{M}_j^k\}_q$  для каждой кривой  $\Phi_q(\tau)$  ( $1 \leq q \leq 7$ ).

4. По алгоритму финишного усреднения с заданными функциями  $k_z(j)$  ( $1 \leq z \leq 6$ ) по каждому непустому множеству величин коэффициентов модели  $\{\bar{M}_j^k\}_q$  находим все варианты их средних расчётных значений:

$$\bar{M}_{p(qz)}^k = (m_{1p(qz)}^k, \dots, m_{pp(qz)}^k), \quad (1 \leq z \leq 5). \quad (7)$$

5. Для каждой эталонной кривой  $\Phi_q(\tau)$  и каждого закона усреднения  $k_z(j)$  ( $1 \leq z \leq 6$ ) определяем относительные отклонения расчётных значений коэффициентов от теоретических:

$$\delta m_{1(qz)}^k = \left| \left( m_{1p(qz)}^k - m_{1m}^k \right) / m_{1m}^k \right|, \dots, \delta m_{p(qz)}^k = \left| \left( m_{pp(qz)}^k - m_{pm}^k \right) / m_{pm}^k \right|. \quad (8)$$

6. Для модели  $\bar{M}^k$  по результатам предварительных расчётов вводим равномерный показатель качества  $\delta_k$  ( $0,05 \leq \delta_k \leq 0,2$ ) и отбрасываем все законы усреднения, у которых хотя бы на од-

ной эталонной кривой  $\Phi_q(\tau)$  для одного из коэффициентов нарушено условие

$$\delta m_{l(qz)}^k \leq \delta_k, \quad (9)$$

т. е. отклонение расчётного коэффициента модели слишком велико.

7. Для всех оставшихся законов усреднения, у которых по всем эталонным кривым  $\Phi_q(\tau)$  для всех коэффициентов модели выполнено условие (5), вычисляем суммы

$$\delta_z = \sum_{q=1}^7 \sum_{l=1}^p \delta m_{l(qz)}^k. \quad (10)$$

В качестве оптимального закона усреднения  $z_{\text{опт}}$  принимаем такое значение  $z$ , при котором достигается минимум функции  $\delta_z$ :

$$\delta_{z_{\text{опт}}} = \sum_{q=1}^7 \sum_{l=1}^p \delta m_{l(qz)}^k \rightarrow \min(z). \quad (11)$$

По общему алгоритму (1–5) выполнено численное исследование предложенного метода построения модели  $\bar{M}^1$ . В результате выявлено, что оптимальным методом усреднения для модели является линейно-синусный закон.

Прогнозирование изменения внешней нагрузки при помощи предложенных моделей нулевого и первого порядков позволяет получить хорошее соответствие расчётных данных с заданными точными законами изменения нагрузки. Построенные на основе использования моделей  $\bar{M}^0$ ,  $\bar{M}^1$  и учёта особенностей функционирования реальных контроллеров алгоритмы управления, а также интерфейсы обмена данными позволяют практически реализовать управление одностепенными приводами при помощи микроконтроллеров с открытой архитектурой, например AVR–микроконтроллеров фирмы Atmel.

#### **Библиографические ссылки**

- Глушенко В.В. Прогнозирование. М.: Вузовская книга, 2006. 208 с.
- Петров Ю.П. Новые главы теории управления и компьютерных вычислений. Серия: учеб. для вузов. СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2012. 192 с.

## Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присыпаемых для публикации,  
можно найти на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

УДК 621.785.

**И.Ф. Дьяков,** д-р техн. наук, проф. (Ульяновский государственный технический университет),  
**Ю.В. Моисеев,** канд. экон. наук (ЗАО «Система безопасности», г. Ульяновск)

i.dyakov@ulstu.ru

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

*Изложен метод очистки поверхностей изделий в заданном диапазоне ультразвуковых колебаний путём распространения непрерывного вихревого потока очищающей жидкости, который за счёт гидродинамического абразивного эффекта отрывает частицы загрязнений и обеспечивает повышение эффективности процесса очистки поверхности.*

**Ключевые слова:** ультразвуковые колебания, гидродинамический абразивный эффект, вихревой поток.

*The cleaning method of the articles surface in the specified range of ultrasonic oscillations is stated. The cleaning is fulfilled by spread of the cleaning fluid continuous vortical stream, that tears off the pollution particles owing to the hydrodynamic abrasive effect and provides increasing of the surface cleaning efficiency.*

**Key words:** ultrasonic oscillations, hydrodynamic abrasive effect, the vortical flow.

**Введение.** Современные производства, особенно в микроэлектронной и полупроводниковой промышленности, предъявляют повышенные требования к чистоте поверхностей различного рода деталей и изделий для обеспечения нормального протекания технологических процессов.

Известные методы ультразвуковой очистки поверхности [1] заключаются в том, что при размещении изделий в жидкой среде и возбуждении в ней ультразвуковых колебаний происходит очистка поверхности струёй озвученной моющей жидкости по радиусу от центра к периферии и обратно. Изделие врашают относительно подаваемой струи в плоскости, перпендикулярной направлению её подачи, а с обратной стороны изделия по всей траектории создают второй поток жидкости.

Недостатками таких и аналогичных методов ультразвуковой очистки являются низкая эффективность, падение амплитуды колебаний в процессе работы и необходимость помещения изделия в специальную ёмкость. Кроме того, озвученная струя не обеспечивает полный отрыв частиц грязи от поверхности с различными конфигурациями.

Ниже предлагается новый, ультразвуковой гидродинамический метод очистки поверхности [2], особенностью которого является использование сил инерции, действующих на поверхности изделий со стороны циркулирующей жидкости.

Очищаемую поверхность сканируют непрерывной струёй очищающей жидкости, озвученной ультразвуковыми колебаниями и закрученной до достижения вихревого эффекта. Ультразвуковые колебания, распространяясь в струе жидкости, достигают поверхности и производят её очистку за счёт кавитации. Оторвавшиеся частицы грязи, увлекаемые вихревой струёй и вращающиеся под

её воздействием как внутри вихря, так и на его периферии, способствуют более эффективному очищению поверхности благодаря возникновению гидродинамического абразивного эффекта.

Кинематическая схема, представленная на рисунке, поясняет предложенный метод очистки поверхностей. Показаны планы скоростей и инерционных сил в точке A между стенкой камеры и поверхностью изделия на установленном режиме (см. рис. а). В этой точке очищающая жидкость имеет абсолютную скорость  $c$ , которая слагается из геометрической суммы переносной (окружной)  $u$  и относительной  $w$  скоростей:

$$c = u + w.$$

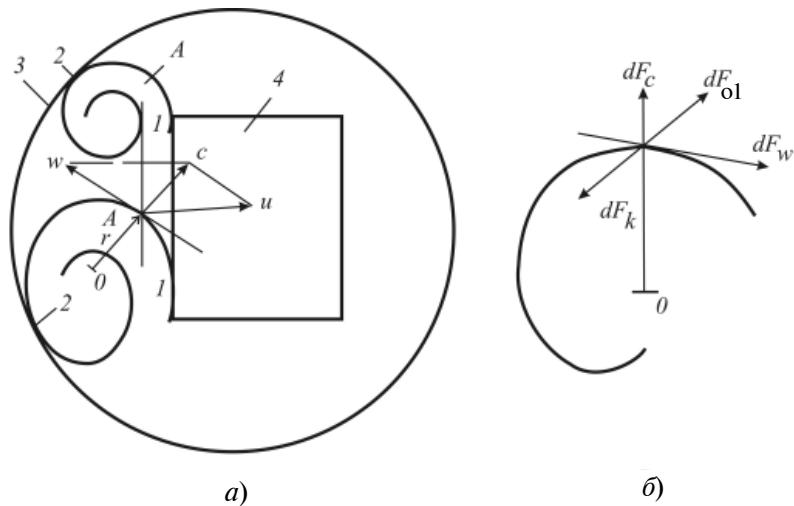
Векторы скоростей  $u$  и  $w$  направлены по касательным в точке A:  $u$  – к окружности радиусом  $OA$  в сторону вращения вихря;  $w$  – к линиям точки 1 A 2 очищающей жидкости во внешнюю сторону.

На каждую частицу очищающей жидкости, проходящую через точку A, действуют следующие элементарные силы инерции:  $dF_c$ ,  $dF_o$ ,  $dF_w$  и  $dF_k$  (см. рис. б). Сила  $dF_c$ , являющаяся центробежной, возникает вследствие переносного движения, и её модуль может быть найден из уравнения

$$dF_c = dm r_c \omega^2,$$

где  $dm$  – масса элементарной частицы очищающей жидкости, находящейся в точке A;  $r_c$  – расстояние от точки A до центра ультразвуковой камеры;  $\omega$  – угловая скорость переносного движения.

Сила  $dF$  представляет собой первую составляющую центробежной силы инерции  $dF_o$  относитель-



**Планы скоростей вихря (а) и инерционных сил (б):**

1A2 – линия действия силы инерции вращающейся жидкости; 3 – корпус резонатора;  
4 – обрабатываемая деталь;  $dF_c$ ,  $dF_{o1}$ ,  $dF_w$ ,  $dF_k$  – направление инерционные сил;  
 $r$  – радиус кривизны траектории движения жидкости

ного движения, появление которого обусловлено криволинейностью поверхности изделия. Уравнение для определения модуля этого вектора имеет вид

$$dF_{o1} = dmw^2/r_1,$$

где  $r_1$  – радиус кривизны в точке  $A$  развертки линии вихревого потока на плоскость, перпендикулярную оси установки изделия.

Вектор  $dF_{o2}$  направлен по нормали к проекции линии тока на меридиональную плоскость в сторону внешнего тора (на рис. вектор  $dF_{o2}$  не показан). Результирующая сила  $dF_o$  равна геометрической сумме:

$$dF_o = dF_{o1} + dF_{o2}.$$

Возникновение силы  $dF_w$  вызвано неравномерностью относительной скорости  $w$ . План инерционных сил соответствует случаю ускоренного движения очищающей жидкости вдоль линии тока.

Для установления связи силы  $F_w$  с вариацией относительной скорости  $w$  может быть использовано уравнение

$$dF_w = dm dw/dt.$$

Вектор  $dF_k$  представляет собой силу Кориолиса, появляющуюся в результате наложения относительного и переносного (вращательного) движения. Её модуль определяется из уравнения

$$dF_k = 2dmw\omega \sin(w, \omega).$$

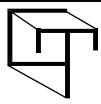
Вектор  $dF_c$  направлен по линии  $OA$ . Линиями действия векторов  $dF_o$  и  $dF_w$  служат, соответст-

венно, нормаль и касательная к линии тока в точке  $A$ . Вектор  $dF_o$  направлен по нормали от центра кривизны вихревой струи. Направления векторов  $dF_w$  и  $w$  совпадают при замедлении и противоположны при ускорении относительного движения очищающей жидкости. Для определения направления силы  $dF_k$  необходимо спроектировать вектор  $w$  на плоскость, перпендикулярную главной оси гидродинамического вихря, затем повернуть полученную проекцию на угол  $90^\circ$  против направления переносного вращения. Градиент давлений вдоль линии тока, обусловленный действием указанных сил инерции, вызывает вихревую циркуляцию очищающей жидкости.

**Заключение.** Процесс удаления загрязнений с поверхности изделия по новому методу происходит намного легче и эффективнее, так как вихревая струя удаляет частицы грязи при меньшей мощности ультразвуковых колебаний. Если некоторые частицы грязи не смогут полностью оторваться от очищаемой поверхности при обычном воздействии ультразвука, то под дополнительным воздействием вихревой струи за счёт гидродинамического абразивного эффекта они будут оторваны от поверхности и удалены. Это достигается благодаря тому, что энергия вихревой струи многократно превосходит энергию обычной струи.

#### Библиографические ссылки

1. **Новое** в ультразвуковой технике и технологии: тезисы докл. Всесоюз. науч.-технич. совещания (Воронеж, 17–19 сент. 1974). М.: Машпром, 1974. С. 56–77.
2. **Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В.** Способ ультразвуковой гидродинамической очистки поверхностей изделий // Патент России № 2427433. 2011. Бюл. № 24.



УДК 62-526

**Е.В. Капля**, канд. физ.-мат. наук, доц.  
 (Филиал Московского энергетического института, г. Волжск)  
 ev-kaple@yandex.ru

## СИСТЕМА ФИНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

*Составлена структурная схема автоматической системы финитного управления сервоприводами лопастей поворотно-лопастного ветроколеса. Предложен закон финитного управления приводами на основе двигателей постоянного тока. Выполнен сравнительный анализ переходных процессов переустановки лопасти с применением ПИД-закона и финитного управления.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ветроколесо, угол установки лопасти, финитное управление, серводвигатель, сервопривод, лопасть.

*The structural diagram of the finite control automatic system for blades servo-drivers of the rotary-blade wind wheel is constituted. The drives finite control law from direct current motors is offered. The comparative analysis of the blade resetting transition processes with the PID-law and finite control application is carried out.*

**Key words:** windmill, wind wheel, blade mounting angle, finite control, servomotor, servo drive, blade.

**Введение.** Повышение энергоэффективности ветроэнергетических установок (ВЭУ) достигается совершенствованием аэродинамических характеристик и оптимизацией систем управления ВЭУ [1, 2]. Одна из основных задач системы управления ветроэлектрической установкой – стабилизация частоты электрического тока. Частота электрического тока, вырабатываемого синхронным генератором, непосредственно связана с угловой скоростью вращения ветроколеса (ВК). При изменении скорости воздушного потока управление угловой скоростью вращения ВК обычно осуществляется поворотом лопастей [3, 4] относительно их собственных продольных осей (рис. 1 на 2-й полосе обложки). Поворотно-лопастной механизм позволяет стабилизировать частоту вращения ВК и уменьшить аэродинамическую нагрузку ВК при ураганном ветре путём флюгирования лопастей.

Современные поворотно-лопастные ВЭУ (ПЛВЭУ) – сложные автоматизированные устройства. Система управления лопастями ВЭУ содержит блок управления и исполнительные механизмы. Существующие ПЛВЭУ имеют электромеханические или электрогидромеханические сервоприводы [2–4]. Каждая лопасть, как правило, оснащается индивидуальным сервоприводом. В известных системах ориентации лопастей использованы асинхронные двигатели переменного

тока или коллекторные двигатели постоянного тока. С целью поддержания стабильной частоты тока на выходе генератора ВЭУ и стабильной частоты вращения ВК используют ПИД-регуляторы [3, 4].

При запуске ПЛВЭУ лопасти ВК устанавливаются под углом  $\theta$ , при котором достигается максимальный вращающий момент на валу ВК, обеспечивается наибольшее угловое ускорение ВК и наименьшая продолжительность разгона. Для останова ВК лопасти устанавливаются во флюгерное положение  $\bar{\theta}$ , в котором вращающий момент минимален. Применение ПИД-регулятора при разгоне и останове ВК приводит к существенному перерегулированию и (или) к появлению ошибки регулирования. В процессе разгона или останова ВК вместо ПИД-закона управления целесообразно использовать алгоритмы финитного управления.

Целями исследования данной работы являются:  
 разработка алгоритма финитного управления сервоприводами лопастей ПЛВЭУ;

проверка работоспособности алгоритма на основе имитационной модели переходных процессов сервопривода;

сравнительный анализ переходных процессов переустановки лопасти с применением закона финитного управления и ПИД-закона.

**Математическая модель сервопривода лопастей.**  
 Основа математической модели двигателя посто-

янного тока – известная система [5] дифференциальных уравнений:

$$J \cdot \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} = k_m \cdot i(t) - \frac{M_c'(t)}{n}, \quad (1)$$

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) = u(t) - k_\omega \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции ротора двигателя;  $\alpha(t)$  – угол поворота ротора двигателя;  $i(t)$  – ток в цепи якоря;  $k_m$  – коэффициент пропорциональности, связывающий ток в цепи якоря и развиваемый двигателем врачающий момент;  $u(t)$  – напряжение питания двигателя;  $M_c'(t)$  – момент сопротивления нагрузки;  $1/n$  – передаточное число редуктора сервопривода лопасти – отношение угловой скорости поворота лопасти к угловой скорости вращения ротора двигателя;  $L$  – индуктивность цепи якоря;  $R$  – активное сопротивление цепи якоря;  $k_\omega$  – коэффициент противоЭДС.

Передача врачающего момента от вала двигателя к лопасти осуществляется зубчатыми колёсами редуктора. Такую передачу можно считать жёсткой и использовать пропорцию:

$$\alpha(t) = n \cdot \theta(t),$$

где  $\theta(t)$  – угол установки лопасти.

Выразив  $i$  из уравнения (1) и подставив в (2), получим уравнение:

$$A \cdot \frac{d^3\alpha(t)}{dt^3} + B \cdot \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + C \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} = f(t), \quad (3)$$

где  $A = L \cdot J$ ,  $B = R \cdot J$ ,  $C = k_\omega \cdot k_m$ ,

$$f(t) = k_m \cdot u(t) - \frac{R}{n} \cdot M_c'(t) - \frac{L}{n} \cdot \frac{dM_c'(t)}{dt}.$$

Угловая скорость  $\omega(t)$  вращения ротора двигателя описывается уравнением:

$$A \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + B \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + C \cdot \omega(t) = f(t). \quad (4)$$

Уравнение (3) запишем для  $\theta(t)$  и проинтегрируем по времени:

$$A \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + C \cdot \theta(t) = F(t), \quad (5)$$

где

$$F(t) = \int_0^t \left( \frac{k_m}{n} \cdot u(\tau) - \frac{R}{n^2} \cdot M_c'(\tau) \right) d\tau - \frac{L}{n^2} \cdot M_c'(t). \quad (6)$$

Момент механических сил сопротивления вращающихся деталей редуктора и лопасти представим функцией [6]:

$$M_c'(t) = \begin{cases} \chi_1 \cdot \omega'(\tau) + \chi_0, & \text{если } \omega'(\tau) > 0, \\ \chi_1 \cdot \omega'(\tau) - \chi_0, & \text{если } \omega'(\tau) < 0, \\ 0, & \text{если } \omega'(\tau) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\omega'(\tau)$  – угловая скорость поворота лопасти;  $\omega'(\tau) = \omega(\tau)/n$ ;  $\chi_0$  – момент трогания;  $\chi_1$  – коэффициент динамического сопротивления редуктора и лопасти.

**Математическая модель автоматизированного сервопривода лопасти.** Структурная схема существующих автоматизированных сервоприводов лопастей представлена на рис. 2 (на 2-й полосе обложки). На схеме использованы следующие обозначения:

$\theta_{\text{зад}}(t)$  – заданное значение угла установки лопасти;

$\theta_{\text{изм}}(t)$  – измеренное значение угла установки лопасти;

$\Delta\theta(t)$  – ошибка регулирования;  $\Delta\theta(t) = \theta_{\text{зад}}(t) - \theta_{\text{изм}}(t)$ ;

$E(t)$  – противоЭДС;  $E(t) = k_\omega \cdot \omega(t)$ ;

$\Delta u = u(t) - E(t)$ ;

$M_{\text{вр}}(t)$  – врачающий момент, создаваемый двигателем;  $M_{\text{вр}}(t) = k_m \cdot i(t)$ ;

$J$  – суммарный момент инерции якоря двигателя, редуктора и лопасти в пересчёте к валу двигателя;

$\varepsilon(t)$  – мгновенное угловое ускорение ротора двигателя.

Угловое ускорение ротора двигателя постоянно пропорционально напряжению питания:

$$u(t) = k_u \cdot \varepsilon(t), \quad (8)$$

где  $k_u = \frac{J}{k_m} \cdot R$  – коэффициент пропорциональности между напряжением питания двигателя и угловым ускорением ротора.

Угловое ускорение ротора связано с осевым угловым ускорением  $\varepsilon'(t)$  лопасти:

$$\varepsilon(t) = n \cdot \varepsilon'(t). \quad (9)$$

Угол установки лопасти, угловая скорость поворота лопасти вокруг собственной оси и угловое ускорение лопасти связаны интегральными формулами:

$$\omega'(\tau) = \int_0^t \varepsilon'(\tau) d\tau, \quad \theta(t) = \int_0^t \omega'(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Редуктор сервопривода лопасти позволяет увеличить врачающий момент и точность углового

позиционирования лопасти. Контроль углового положения лопастей осуществляют с помощью энкодеров. Контроллер системы управления сервоприводами лопастей и серводвигатели лопастей устанавливаются во внутренней полости ступицы ВК. В каждый момент времени лопасти подвергаются различным механическим нагрузкам. Оснащение каждой лопасти независимым сервоприводом, предполагает индивидуальный контроль углового положения каждой лопасти.

**Финитное управление сервоприводом лопасти.** Начальные и конечные условия задачи финитного управления сервоприводами лопастей ВК имеют вид:

$$\theta(T_0) = \theta_0, \quad \omega'(T_0) \equiv \frac{d\theta(t)}{dt} \Big|_{t=T_0} = \omega'_0 = 0, \quad (11)$$

$$\theta(\hat{T}) = \hat{\theta}, \quad \omega'(\hat{T}) \equiv \frac{d\theta(t)}{dt} \Big|_{t=\hat{T}} = \hat{\omega} = 0, \quad (12)$$

где  $T_0$  – момент времени начала переходного процесса;  $\hat{T} = T_0 + T + \Delta T$ ;  $T$  – продолжительность переходного процесса (поворота лопасти от  $\theta_0$  до  $\hat{\theta}$ );  $\Delta T$  – жёсткость управления (временной интервал между ведущей и ведомой фазовыми точками).

Угловое ускорение лопасти представим функцией с двумя (по числу конечных условий) параметрами [7]:

$$\varepsilon'(t) = k_1 \cdot (t - T_0) + k_0. \quad (13)$$

С помощью интегральных преобразований (10) на основе (13) получаем:

$$\begin{cases} \omega'(t) = k_1 \cdot \frac{(t - T_0)^2}{2} + k_0 \cdot (t - T_0) + k', \\ \theta(t) = k_1 \cdot \frac{(t - T_0)^3}{6} + k_0 \cdot \frac{(t - T_0)^2}{2} + k' \times \\ \times (t - T_0) + k''. \end{cases} \quad (14)$$

Так как  $\omega'(T_0) = \omega'_0$  и  $\theta(T_0) = \theta_0$ , то  $k' = \omega'_0$  и  $k'' = \theta_0$ .

В конечный момент времени формулы (14) принимают вид системы уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\omega} \equiv \omega'(\hat{T}) = k_1 \cdot \frac{(T + \Delta T)^2}{2} + \\ + k_0 \cdot (T + \Delta T) + \omega'_0, \\ \hat{\theta} \equiv \theta(\hat{T}) = k_1 \cdot \frac{(T + \Delta T)^3}{6} + \\ + k_0 \cdot \frac{(T + \Delta T)^2}{2} + \omega'_0 \cdot (T + \Delta T) + \theta_0. \end{cases} \quad (15)$$

Решив систему уравнений (15) относительно  $k_0$  и  $k_1$ , получим:

$$\begin{cases} k_0 = \frac{\frac{6}{T+\Delta T} \cdot (\hat{\theta} - \theta_0) - 2 \cdot (\hat{\omega} + 2 \cdot \omega'_0)}{T + \Delta T}, \\ k_1 = \frac{6 \cdot (\omega'_0 + \hat{\omega}) - \frac{12}{T+\Delta T} \cdot (\hat{\theta} - \theta_0)}{(T + \Delta T)^2}. \end{cases} \quad (16)$$

В соответствии с выражениями (8), (9), (13) и (16) финитный закон управления приобретает вид:

$$u(t) = k_u \cdot n \cdot \left( \frac{6 \cdot (\omega'_0 + \hat{\omega}) - \frac{12}{T+\Delta T} \cdot (\hat{\theta} - \theta_0)}{(T + \Delta T)^2} \times \right. \\ \left. \times (t - T_0) + \frac{\frac{6}{T+\Delta T} \cdot (\hat{\theta} - \theta_0) - 2 \cdot (\hat{\omega} + 2 \cdot \omega'_0)}{T + \Delta T} \right). \quad (17)$$

Переход к закону управления с обратными связями осуществляется следующими заменами [7]:

текущего времени  $t$  на начальное время  $T_0$ ;  
продолжительности переходного процесса  $(T + \Delta T)$  на оставшееся время  $(\hat{T} - t)$ ;  
начальных фазовых координат  $\theta_0$  и  $\omega'_0$  на текущие  $\theta(t)$  и  $\omega'(t)$ ;

В результате замен из выражения (17) получим:

$$u(t) = \frac{k_u \cdot n}{\hat{T} - t} \cdot \left( \frac{6 \cdot (\hat{\theta} - \theta(t))}{\hat{T} - t} - \right. \\ \left. - 2 \cdot (\hat{\omega} + 2 \cdot \omega'(t)) \right). \quad (18)$$

В начальном и конечном состоянии угловая скорость поворота лопасти равна нулю. В процессе поворота  $\omega'(t) = \omega(t)/n$ , следовательно, формула (18) принимает вид:

$$u(t) = \frac{k_u}{\hat{T} - t} \cdot \left( \frac{6 \cdot n \cdot (\hat{\theta} - \theta(t))}{\hat{T} - t} - 4 \cdot \omega(t) \right). \quad (19)$$

Финитный закон управления (19) не требует задания точного начального положения лопастей. Закон (19) использует измеренные значения  $\theta_{изм}(t)$  и  $\omega_{изм}(t)$ . Структурная схема автоматизированного сервопривода лопасти с блоком финитного управления представлена на рис. 3 (см. 2-ю полосу обложки).

**ПИД-регулятор угла установки лопасти.** В системе управления приводами лопастей на основе двигателей постоянного тока ПИД-регуляторы

формируют напряжение (сигнал управления) на обмотках двигателя:

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} k_p(\Delta\theta(t) + \frac{1}{T_i} \int_{T_0}^t \Delta\theta(\tau) d\tau + \\ + T_d \frac{d}{dt} \Delta\theta(t)) \text{ при } T_0 \leq t \leq T_0 + T, \\ 0, \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (20)$$

где  $\Delta\theta(t) = \theta_{\text{зад}}(t) - \theta_{\text{изм}}(t)$ ;

$$\theta_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} \theta_0, \text{ если } t < T_0, \\ \frac{t-T_0}{T}(\bar{\theta} - \theta_0) + \theta_0, \text{ если } T_0 \leq t \leq T_0 + T, \\ \bar{\theta}, \text{ если } t > T_0 + T; \end{cases}$$

$\theta_{\text{зад}}(t)$  – заданная функциональная зависимость угла установки лопасти от времени;  $\theta_{\text{изм}}(t)$  – результат измерения угла установки лопасти в момент времени  $t$ ;  $k_p$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора;  $T_i$  – постоянная интегрирования;  $T_d$  – постоянная дифференцирования.

Настройка ПИД-регулятора выполняется на основе математической модели переходных процессов поворота лопасти путём минимизации целевой функции. В качестве целевой функции можно принять:

$$H_1(k_p, T_i, T_d) = \left( \frac{\bar{\theta} - \theta(T_0 + T)}{T} \right)^2 + \left( \bar{\omega} - \frac{\omega(T_0 + T)}{n} \right)^2, \quad (21)$$

$$H_2(k_p, T_i, T_d) = \int_{T_0}^{\infty} \left( \left( \frac{\theta_{\text{зад}}(t) - \theta(t)}{T} \right)^2 + \left( \frac{\omega_{\text{зад}}(t) - \omega(t)}{n} \right)^2 \right) dt, \quad (22)$$

$$\text{где } \omega_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} \omega_0, \text{ если } t < T_0, \\ n \frac{\bar{\theta} - \theta_0}{T}, \text{ если } T_0 \leq t \leq T_0 + T, \\ 0, \text{ если } t > T_0 + T. \end{cases}$$

Функция (21) соответствует настройке регулятора по конечной фазовой точке  $(\bar{\theta}, \bar{\omega})$ . Формула (22) является интегральным показателем качества управления сервоприводом.

**Дискретизация математической модели переходных процессов.** Программная реализация формул (6), (19)–(22) и решений дифференциальных уравнений (4), (5) предполагает дискретизацию времени. Составим числовую последовательность

моментов времени  $t_q = q \cdot \Delta t + t_0$ , где  $q = 0, 1, 2, \dots$  – номер элемента последовательности;  $\Delta t$  – шаг дискретизации времени;  $t_0$  – начальный момент времени. В результате дискретизации времени перейдём от функций к массивам  $\theta_q = \theta(t_q)$ ;  $\omega_q = \omega(t_q)$ ;  $u_q = u(t_q)$ ;  $(M'_c)_q = M'_c(t_q)$ .

Уравнения (3) и (4) в результате конечно-разностной аппроксимации производных принимают вид:

$$A \cdot \frac{\omega_{q+1} - 2 \cdot \omega_q + \omega_{q-1}}{\Delta t^2} + B \cdot \frac{\omega_{q+1} - \omega_{q-1}}{2 \cdot \Delta t} + C \cdot \omega_q = f_q, \quad (23)$$

$$A \cdot \frac{\theta_{q+1} - 2 \cdot \theta_q + \theta_{q-1}}{\Delta t^2} + B \cdot \frac{\theta_{q+1} - \theta_{q-1}}{2 \cdot \Delta t} + C \cdot \theta_q = F_q, \quad (24)$$

где

$$f_q = f(t_q) = k_m \cdot u_q - \frac{R}{n} \cdot (M'_c)_q - \frac{L}{n} \times \frac{(M'_c)_q - (M'_c)_{q-1}}{\Delta t}, \quad (25)$$

$$F_q = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \sum_{b=1}^q \left[ \left( \frac{k_m}{n} \cdot u_{b-1} - \frac{R}{n^2} \cdot (M'_c)_{b-1} \right) + \left( \frac{k_m}{n} \cdot u_b - \frac{R}{n^2} \cdot (M'_c)_b \right) \right] - \frac{L}{n^2} \cdot \frac{(M'_c)_q}{\Delta t}. \quad (26)$$

Формула (26) следует из (6) в результате интегрирования методом трапеций.

Решив (23) и (24) относительно  $\omega_{q+1}$  и  $a_{q+1}$ , получим:

$$\begin{bmatrix} \omega_{q+1} \\ \theta_{q+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_q \omega_{q-1} f_q \\ \theta_q \theta_{q-1} F_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cdot (2 \cdot A - C \cdot \Delta t^2) \\ (B \cdot \Delta t - 2 \cdot A) \end{bmatrix} \times \frac{1}{2 \cdot A + B \cdot \Delta t}. \quad (27)$$

Векторная рекуррентная формула (27) с учётом выражений (25) и (26) для  $q = 0, 1, 2, \dots$  позволяет выполнять математическое моделирование переходных процессов в автоматизированном сервоприводе лопасти. При моделировании необходимо задать начальные значения:  $\theta_0$  и  $\theta_1$ ,  $\omega_0$  и  $\omega_1$ ,  $u_0$  и  $u_1$ .

В результате дискретизации времени закон финитного управления (19) примет вид

$$u_q = \frac{k_u}{\hat{T} - t} \cdot \left( \frac{6 \cdot n \cdot (\hat{\theta} - \theta_q)}{\hat{T} - t} - 4 \cdot \omega_q \right). \quad (28)$$

Из равенства (20) следует рекуррентная формула:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_q &= \tilde{u}_{q-1} + k_p \cdot (\Delta\theta_q - \Delta\theta_{q-1}) + \frac{1}{T_i} \cdot \Delta\theta_q \cdot \Delta t + \\ &+ T_d \cdot \frac{\Delta\theta_q - 2 \cdot \Delta\theta_{q-1} + \Delta\theta_{q-2}}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (29)$$

Целевая функция (21) приобретает вид:

$$H_1(k_p, T_i, T_d) = \left( \frac{\hat{\theta} - \theta_Q}{T} \right)^2 + \left( \hat{\omega} - \frac{\omega_Q}{n} \right)^2, \quad (30)$$

где  $Q = T/\Delta t + 1$ .

**Результаты моделирования.** Графики переходных процессов, представленные на рис. 4 – 6 (см. 3-ю полосу обложки), получены для сервопривода с характеристиками:  $L = 0,01$  Гн;  $R = 2$  Ом;  $k_m = 0,08$  Н · м/А;  $k_\omega = 0,2$  В · с/рад;  $J = 7$  кг · м<sup>2</sup>;  $n = 10$ ;  $\chi_1 = 0,1$  Н · м · с/рад;  $\chi_0 = 0,6$  Н · м при следующих начальных и конечных условиях:  $\omega_0 = \omega_1 = 0$ ;  $\theta_0 = \theta_1 = 1^\circ$ ;  $u_0 = u_1 = 0$ ;  $\hat{\theta} = 4^\circ$ ;  $\hat{\omega} = 0$ . При моделировании были приняты:  $t_0 = 0$ ;  $T_0 = 1$  с;  $T = 3$  с;  $\Delta T = 0,01$  с;  $\Delta t = 10^{-3}$  с;  $Q = 5 \cdot 10^3$ .

Сплошная линия на рис. 4–6 соответствует финитному закону регулирования (19) и (28); пунктирная линия – ПИД-закону (20) и (29), оптимизированному по уравнениям (21) и (30) с ограничением  $u(t) < 100$  В. Графики зависимостей  $\theta(t)$  и  $\omega(t)$  иллюстрируют целесообразность при-

менения финитного закона управления с заданными конечными условиями.

Применение ПИД-закона управления углом установки лопасти при разгоне или останове ВК приводит к существенному перерегулированию угловой скорости поворота лопасти или угла установки лопасти.

**Выводы.** Финитное управление сервоприводами лопастей ВЭУ целесообразно при установке лопастей в разгонное или флюгерное положение.

Финитный закон управления может применяться в комбинации с ПИД-законом управления углом установки лопасти. Финитный закон может использоваться при разгоне или останове ВК, а ПИД-закон в разогнанном состоянии при достаточной скорости ветра.

#### Библиографические ссылки

1. Johnson K.E. Adaptive torque control of variable speed wind turbines // National Renewable Energy Laboratory / TP-500-36265. August 2004. 107 p.
2. Wright A.D., Fingersh L.J. Advanced control design for wind turbines // National Renewable Energy Laboratory / TP-500-42437. March 2008. 148 p.
3. Selvam I., Kanev S.K., Van Wingerden J.W., Van Engelen T.G., Verhaegen M. Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction // International journal of robust and nonlinear control (Wiley Interscience). 2009. Vol. 199. P. 72–91.
4. Potter B., Nagasaki R., Shiga M. Wind turbine blade pitch control system. Patent US 8,070,446 B2. December 6, 2011.
5. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
6. Капля В.И., Капля Е.В. Идентификация динамических характеристик энкодера // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 49–53.
7. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Советское радио. 1977. 256 с.

**Уважаемые авторы и читатели журнала!**

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал «Автоматизация и современные технологии» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 664.95:681.3(06)

**С.П. Сердобинцев, д-р техн. наук, проф., В.С. Ханевич**  
(Калининградский государственный технический университет)

hvsvs@mail.ru

## МЕТОД УПОРЯДОЧИВАНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ АЛЬТЕРНАТИВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЫБНОГО СЫРЬЯ

*Рассмотрена задача рационального распределения рыбного сырья по видам переработки с помощью одного из методов принятия решений при нечёткой исходной информации – метода упорядочивания многокритериальных альтернатив.*

**Ключевые слова:** рыбное сырьё, нечёткая информация, альтернатива, критерии.

*The rational distribution problem of fish raw material in accordance with processing types by means of decision-making method by fuzzy initial information – the multicriterion alternatives ordering method is considered.*

**Key words:** fish raw materials, fuzzy information, alternative, criteria.

**Введение.** Поддержка принятия решения требуется во всех без исключения областях прикладной деятельности человека. Это связано с увеличивающимся объёмом информации, необходимостью учитывать большое количество противоречивых факторов, объективных и субъективных составляющих при принятии решений.

Построение моделей принятия решений для задач, имеющих словесное описание, базируется на методах обработки нечёткой информации, подходах, основанных на идее постепенной формализации проблемы с неопределенностями и других инструментах стратегического анализа и классификации объектов.

Классические методы управления эффективно работают при полностью детерминированных объектах управления и среде. Однако в сложных системах, где человек играет активную роль, создание систем поддержки принятия решений (СППР) невозможно без введения так называемых лингвистических переменных, описывающих неточное (нечёткое) отражение человеком окружающего мира. Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точное значение её термов и степень принадлежности данного значения к тому или иному терму лингвистической переменной, что возможно лишь при рассмотрении процесса экспертами [1].

При разработке СППР возникает проблема выбора адекватных математических моделей, позволяющих отразить структуру сложной системы, для которой принимается решение, оперировать субъективными оценками экспертов, учитывать неясность, неточность данных средствами нечёткой логики.

Распределение рыбного сырья по видам переработки имеет существенное экономическое и

социальное значение. В работе [2] рассмотрена методика качественного и количественного анализа видов переработки рыбного сырья, использующая в качестве основы информацию учётной системы предприятия. Однако задача принятия решения по указанной проблеме нередко формируется с использованием профессиональных понятий, отражающих специфику производства и сбыта рыбной продукции.

В настоящее время среди разработок наиболее эффективных СППР всё большее значение приобретают методы, основанные на нечёткой логике [3], особенно актуальные для систем с неполной, неформализованной информацией и высокой сложностью объекта управления. Успешное применение методов во многом определяется гибким математическим аппаратом, используемым при анализе и обработке данных, способным адекватно отобразить не только не подлежащие строгой формализации зависимости и взаимосвязи, но и учесть неточные, субъективные оценки специалистов, лежащие в их основе.

**Принятие решений при нечёткой исходной информации.** В любой информационно-управляющей системе (ИУС) имеют место СППР. По мере развития предприятия проблема разработки и внедрения СППР становится особенно актуальной. Трудности при принятии решений в системе управления промышленными, в том числе рыбоперерабатывающими, предприятиями связаны со сложностью системы, работающей в нестабильных рыночных условиях, необходимостью точно следовать рекомендациям технологов, оперировать субъективными оценками экспертов, опираться не только на количественный, но и качественный (лингвистический, вербальный) характер оценки поступающей информации.

Успешное функционирование предприятия невозможно без развитой информационной инфраструктуры. Качество информационного обеспечения управления – это важный фактор, определяющий эффективность принимаемых управленческих решений. Создание ИУС предприятия позволяет оптимизировать сложившиеся каналы сбора информации и обеспечить доступной и полной информацией лицо, принимающее решение (ЛПР).

Для реализации рационального распределения рыбного сырья по видам переработки воспользуемся одним из качественных методов принятия решений при нечёткой исходной информации, разработанным О.И. Ларичевым в Институте системного анализа АН СССР [4], – методом упорядочивания многокритериальных альтернатив ЗАПРОС (замкнутые процедуры у опорных ситуаций).

Основная идея метода ЗАПРОС заключается в том, что ЛПР предлагается сравнивать не реальные альтернативы, а некоторые гипотетические варианты, так называемые векторные оценки. Причём допустимой для опроса является такая их пара, которая отличается не более чем двумя компонентами.

**Пример применения метода ЗАПРОС.** Рассмотрим применение метода на примере ранжирования производства некоторых видов рыбной продукции с учётом предпочтений ЛПР и с точки зрения возникшей рыночной ситуации. Метод ЗАПРОС в данном случае применён для упорядочивания сравниваемых вариантов по заданным критериям с последующим выбором наиболее предпочтительного вида рыбопродукции.

Предположим, что предприятие выпускает три вида рыбной продукции: Р1 (рыба солёная), Р2 (рыбные консервы) и Р3 (рыба копчёная). Выделим критерии их оценивания: привлекательность цены, насыщенность рынка данным видом продукции, объём реализации за определённый период. Характеристика продукции по описанным критериям приведена в табл. 1.

В соответствии с критериальными оценками вербальная шкала каждого критерия сопоставляется с базовой (количественной) шкалой (см. ри-

сунок). При этом самая высокая оценка критерия условно принимается за единицу, следующая за ней оценивается как 2 и т. д.

Таким образом, учитывая данные табл. 1, необходимо сравнить векторы, характеризующие конкретный вид рыбной продукции: рыба солёная (1 2 3), рыбные консервы (2 3 1), рыба копчёная (1 3 2).

Для этого сформируем список векторных оценок у опорной ситуации. Опорные ситуации – это векторные оценки, имеющие только лучшие (первая опорная ситуация) или худшие (вторая опорная ситуация) значения по всем критериям. Список векторных оценок у опорных ситуаций – это подмножество векторных оценок, имеющих по всем критериям, кроме одного, те же значения, что и у данной опорной ситуации. Таким образом, для нашего примера список векторных оценок у первой опорной ситуации будет иметь вид {2 1 1, 3 1 1, 1 2 1, 1 3 1, 1 1 2, 1 1 3}.

Сравним полученные векторные оценки у первой опорной ситуации между собой. Для этого составим матрицу парных сравнений  $A_{n \times n} = \|\alpha_{ij}\|$ , где  $n$  – количество векторов у опорной ситуации;  $\alpha_{ij} = \mu(x_i, x_j)$  – степень предпочтения  $x_i$  оценки перед  $x_j$ . Если  $\alpha_{ij} = 1$ , то элемент  $x_i$  предпочтительнее элемента  $x_j$ ; если  $\alpha_{ij} = 2$ , то  $x_i$  равноценен  $x_j$ ; если  $\alpha_{ij} = 3$ , то  $x_j$  предпочтительнее  $x_i$ . Если  $\alpha_{ij} = 0$ , то элементы в строке и столбце ещё не сравнивались.

На основе базовой шкалы заполняем ячейки исходной матрицы.

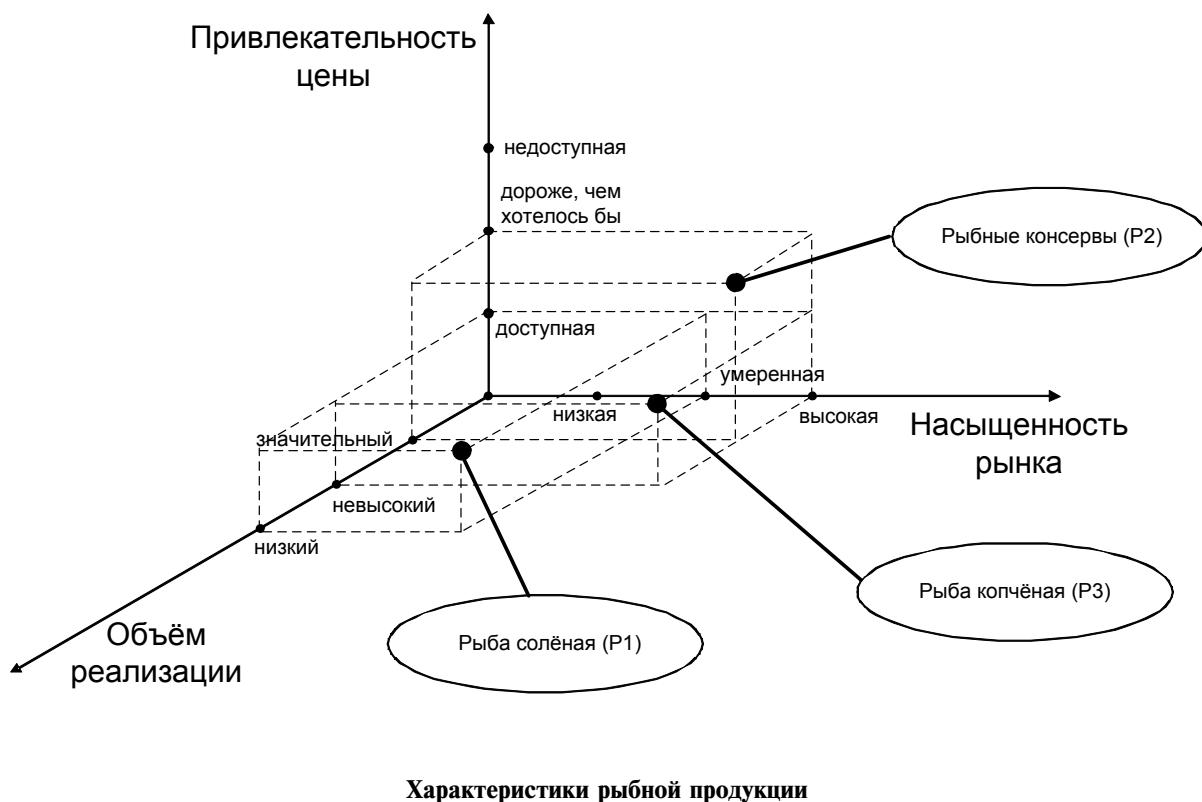
В табл. 2 приведена матрица парных сравнений. В ней для равноценных элементов указана степень предпочтения  $\alpha_{ij} = 2$ , для элементов, отличающихся только одним компонентом, степень предпочтения  $\alpha_{ij} = 1$ , а для ещё не сравненных элементов  $\alpha_{ij} = 0$ .

Далее, задавая ЛПР вопросы о предпочтении той или иной альтернативы, попарно сравниваем альтернативы, постепенно заполняя все ячейки матрицы соответствующими степенями предпочтения (табл. 3). Заметим, что сравнение (2 1 1) с (1 3 1) сделано на основе транзитивности: (2 1 1) лучше (1 2 1), а (1 2 1) лучше, чем (1 3 1) в исходной матрице.

Таблица 1

#### Характеристики рыбной продукции

Рыбная продукция	Привлекательность цены	Насыщенность рынка	Объём реализации
P1 (рыба солёная)	Доступная цена	Умеренная	Низкий
P2 (рыбные консервы)	Дороже, чем хотелось бы	Высокая	Значительный
P3 (рыба копчёная)	Доступная цена	Высокая	Невысокий

**Характеристики рыбной продукции****Таблица 2****Первый шаг заполнения матрицы парных сравнений**

Альтернативы	2 1 1	3 1 1	1 2 1	1 3 1	1 1 2	1 1 3
2 1 1	2	1	0	0	0	0
3 1 1		2	0	0	0	0
1 2 1			2	1	0	0
1 3 1				2	0	0
1 1 2					3	1
1 1 3						2

**Таблица 3****Второй шаг заполнения матрицы парных сравнений**

Альтернативы	2 1 1	3 1 1	1 2 1	1 3 1	1 1 2	1 1 3
2 1 1	2	1	1	1	0	0
3 1 1		2	0	0	0	0
1 2 1			2	1	0	0
1 3 1				2	0	0
1 1 2					2	1
1 1 3						2

Полученную от ЛПР информацию необходимо проверить на непротиворечивость. После каждого ответа экспертные оценки дополняются по транзитивности (строится так называемое «транзитивное замыкание»). В табл. 4 такие элементы выделены жирным шрифтом. При обнаружении нетранзитивности ЛПР следует изменить ответы таким образом, чтобы устраниТЬ выявленное противоречие.

Матрица, полностью заполненная ЛПР, приведена в табл. 5.

В соответствии с данными матрицы из табл. 5 упорядочим векторные оценки: (2 1 1), (3 1 1),

(1 2 1), (1 1 2), (1 3 1), (1 1 3). Если по некоторым векторам имеются равные оценки, то ЛПР задаются дополнительные вопросы для сравнения спорных оценок у опорной ситуации.

Используя единую порядковую шкалу  $\{(2 1 1), (3 1 1), (1 2 1), (1 1 2), (1 3 1), (1 1 3)\}$ , упорядочим Р1, Р2, Р3 по следующему принципу: первое значение по любому критерию имеет ранг 1, второе значение по первому критерию (2 1 1) – ранг 2 и т. д.

На основании табл. 6 сделаем вывод: векторная оценка, описывающая Р2, лучше, чем оценки Р1 и Р3, далее можно предположить, что Р1 лучше Р3.

Таблица 4

## Третий шаг заполнения матрицы парных сравнений

Альтернативы	2 1 1	3 1 1	1 2 1	1 3 1	1 1 2	1 1 3
2 1 1	2	1	1	<b>1</b>	1	<b>1</b>
3 1 1		2	1	<b>1</b>	3	1
1 2 1			2	1	1	<b>1</b>
1 3 1				2	3	1
1 1 2					2	1
1 1 3						2

Таблица 5

## Заполненная матрица парных сравнений

Альтернативы	2 1 1	3 1 1	1 2 1	1 3 1	1 1 2	1 1 3
2 1 1	2	1	1	<b>1</b>	1	<b>1</b>
3 1 1	3	2	1	<b>1</b>	3	1
1 2 1	3	3	2	1	1	<b>1</b>
1 3 1	3	3	3	2	3	1
1 1 2	3	1	3	1	2	1
1 1 3	3	3	3	3	3	2

Таблица 6

## Оценки видов рыбной продукции

Рыбная продукция	Привлекательность цены	Насыщенность рынка	Объём реализации	Векторная оценка по единой порядковой шкале	Векторная оценка по возрастанию рангов
P1	1	2	3	1 4 7	1 4 7
P2	2	3	1	2 6 1	1 2 6
P3	1	3	2	1 6 5	1 5 6

Таким образом, после упорядочивания видов рыбной продукции (Р2, Р1, Р3) установлено, что наиболее предпочтительным является Р2 (рыбные консервы).

Рассмотренный метод, в отличие от предложенной в работе [2] методики, основан на использовании нечёткой исходной информации и применён для упорядочивания сравниваемых вариантов по предпочтительности с учётом заданных критериев и предпочтений экспертов.

Описанный выше пример иллюстрирует основные особенности постановки задач оптимизации при разрешении реальных проблем: много critериальность; весомость критериев, основанных на субъективных оценках; необходимость одновременного учёта неопределённостей различной природы, а также комплексность и многоаспектность проблем моделирования и оптимизации при постановке и решении реальных

задач распределения рыбного сырья по видам переработки.

**Выводы.** Таким образом, метод ЗАПРОС позволяет ранжировать альтернативы по субъективным вербальным оценкам с учётом значимости критериев, что особенно важно для многокритериальных задач.

#### **Библиографические ссылки**

1. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: ЛЭГИ, 2001. 138 с.
2. Сердобинцев С.П., Ханевич В.С. Управление распределением рыбного сырья по видам переработки в рыночных условиях // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 11. С. 35–40.
3. Турухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука. 1981. 258 с.
4. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Верbalный анализ решений. М.: Наука, Физматлит, 1996. 208 с.

---

УДК 004.4:621

**И.С. Шеков, А.Г. Янишевская, д-р техн. наук**  
(Омский государственный технический университет)

shekov@bk.ru

### **АЛГОРИТМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Рассмотрена проблематика проектирования технологических процессов в машиностроении. Предложен алгоритм программы для автоматического проектирования технологических процессов.*

**Ключевые слова:** системы автоматизированного проектирования, алгоритм, технологический процесс, программы.

*Range of problems of the technological processes and machine-building production is considered. The program algorithm for automatic projecting of the technological processes is proposed.*

**Key words:** automatic projecting systems, algorithm, technological process, programs.

Одной из основных проблем производства является внедрение CALS-технологий, включающих в себя следующие операции: проектирование деталей, составление технологических процессов (ТП) и маршрутных карт изготовления деталей, изготовление и тестирование опытных образцов, изготовление и обработка готовых деталей.

В последнее время в России создаются программы, в которых инженеры-технологи предприятий могут создавать ТП на всех этапах жизненного цикла детали. Но данные программы

имеют общую особенность – отсутствие способности самостоятельно разрабатывать технологическую документацию и управляющие программы для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что делает их зависимыми от проектировщика, который должен задавать параметры во время каждого этапа проектирования.

При автоматизации проектирования ТП и подготовки производства необходимо стремиться к созданию таких программ, которые самостоя-

тельно на основе данных о детали, оборудовании и сортаменте предприятия производили бы расчёты, описание, документацию ТП и управляющие программы [1, 2, 3].

Предлагается создать программный продукт, который будет в автоматическом режиме производить проектировку ТП и управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Такая программа должна выполнять следующие функции:

1. Анализ 3D-модели детали;
2. Определение необходимой заготовки по данным 3D-модели детали;
3. Поиск сортамента материала для создания заготовки;
4. Создание карты заказа сортамента в случае отсутствия необходимого материала;
5. Определение операций для получения заготовки;
6. Создание маршрутной карты изготовления заготовки;
7. Создание маршрута перемещения заготовки между обрабатывающими станками и прочим оборудованием цеха или его участка;
8. Создание списка операций обработки для каждого станка с определением технологической оснастки и обрабатывающего инструмента;
9. Параллельно с операциями из п. 6 программа должна создавать управляющую программу для конкретного станка с ЧПУ;
10. Создание заявки на проектирование и изготовление технологической оснастки, обрабатывающего инструмента и на доработку оборудования в случае отсутствия необходимых инструментов;
11. По заключению проектировки операций обработки должен создаваться оформленный согласно ЕСТД файл ТП и маршрутных листов, описывающий все этапы жизненного цикла изготавливаемой детали, а также программы для оборудования с ЧПУ.

Анализ 3D-модели детали должен включать определение: количества деталей к изготовлению; габаритов детали для изготовления заготовки; материала, из которого необходимо изготавливать деталь; координат размерных цепочек и размеров частей детали для обработки заготовки; типов обработки готовой детали.

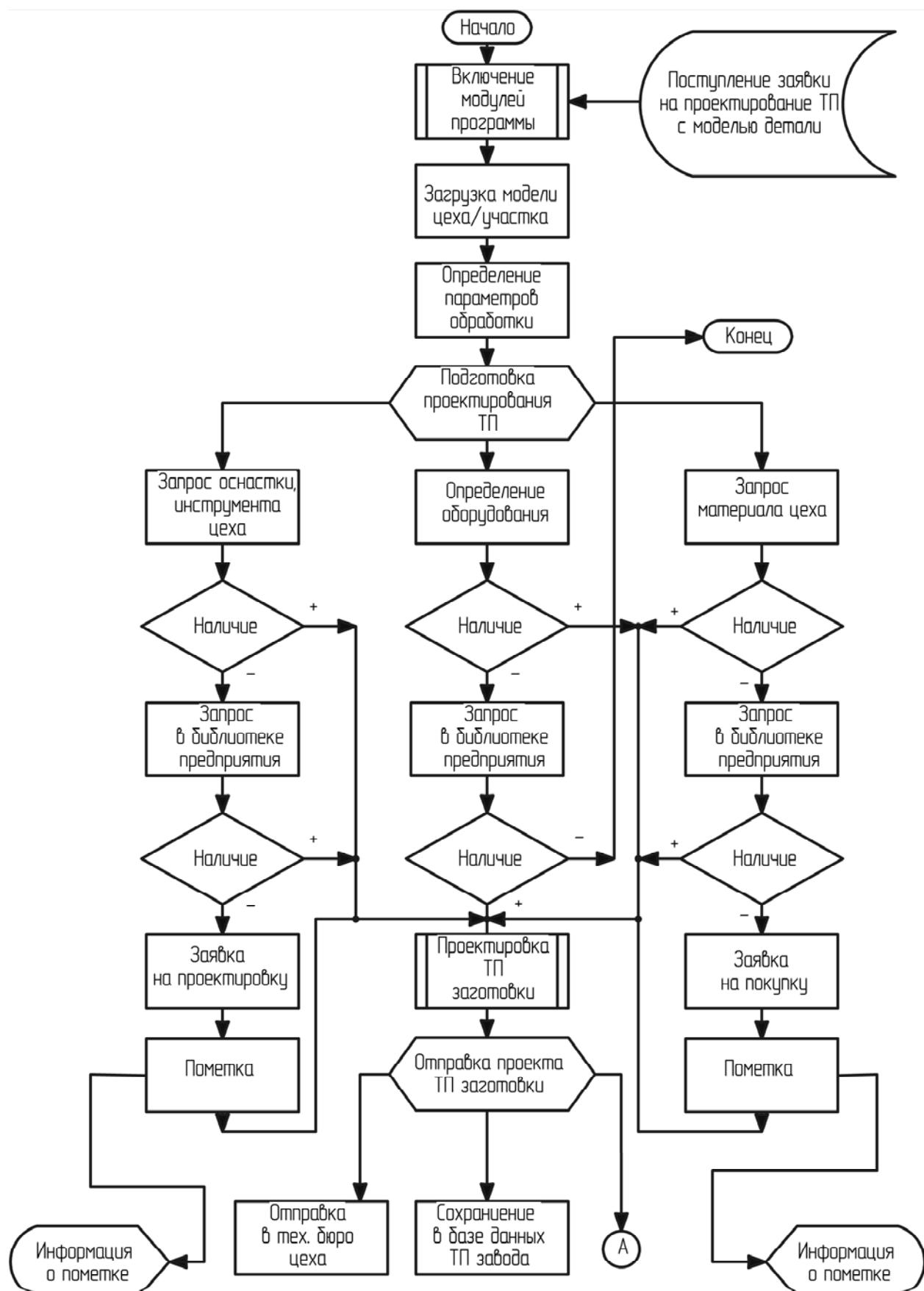
При проектировании для универсализации работы необходимо учесть взаимодействие данной программы с другими конструкторскими программами, так как на многих предприятиях используют различные системы проектирования. Модели, создаваемые в различных САПР, должны отвечать требованиям ЕСКД, нести полную информацию, содержащуюся в анализе 3D-модели детали [1, 2].

После анализа программа создаёт модель заготовки для данной детали по её основным габаритам и свойствам материала. Начинается процесс проектирования подготовки производства.

В программе должны присутствовать библиотеки сортаментов. Основная библиотека должна содержать весь перечень сортамента материалов, определённый нормативными документами Российской Федерации. Остальные библиотеки создаются отделом подготовки производства на предприятии для каждого отдельного цеха и его участков, находясь в общем доступе для сотрудников предприятия на сервере локальной производственной сети. Таким образом, программа после создания модели заготовки детали обращается к библиотеке имеющегося сортамента конкретного цеха, в котором будет происходить изготовление заготовки. Происходит проверка объёма сортамента и степень его используемости. В случае недостаточного объёма материала для изготовления заготовок формируется карта заказа в отдел подготовки производства на закупку необходимого объёма материала. Если в библиотеке цеха требуемый вид материала не обнаружен, программа обращается в общезаводскую библиотеку, в которой указаны все сортаменты, имеющиеся на заводе, а также их адреса в цехах. Аналогично происходит проверка «загруженности» необходимого сортамента. При отсутствии или недостаточности материала в других цехах также формируется карта заказа на закупку и поставку определённого сортамента в конкретный цех или на его участок. В случае отсутствия сортамента на заводе программа не прекращает моделировать технологический процесс, но делает пометку в проекте на данном этапе о необходимости ожидания ответа от отдела подготовки производства по данному сортаменту.

Определяются операции для получения заготовки, и создаётся её маршрутный лист, составленный в виде бланка согласно ЕСТД.

В соответствии с видом детали, которая может быть цилиндрической, корпусной или сложной формы, программа определяет виды станков для выполнения технологических операций. Поэтому в общезаводской базе данных заранее должны быть созданы модели цеха или участка со всем оборудованием. В этих моделях указываются все свойства используемых станков или обрабатывающих центров, которые нужны для полного моделирования их работы. В программе также должна быть заложена функция моделирования вспомогательных и транспортных операций как основного оборудования (станки, обрабатывающие центры), так и вспомогательного (роботы, транспортные тележки; автоматизированные склады заготовок, оснастки, готовой продукции).



**Рис. 1. Алгоритм проектирования технологических процессов заготовки**

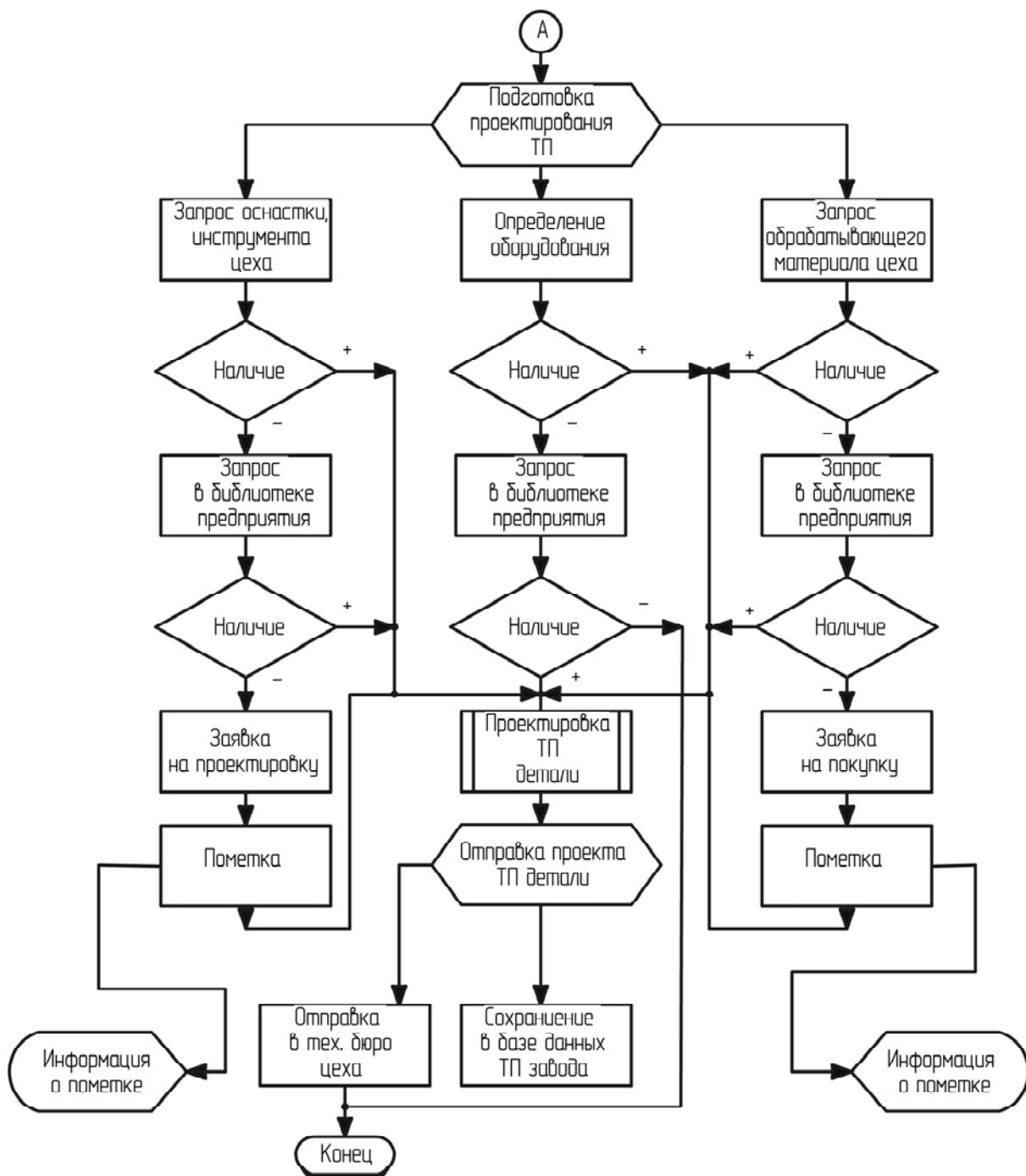


Рис. 2. Алгоритм проектирования технологических процессов детали

Это требуется для создания полной маршрутной карты и карт технологического планирования, ТП изготовления детали, её транспортировки, обработки и поставки на склад. Кроме того, программа позволяет моделировать весь процесс изготовления детали и корректировать его в реальном времени. Поэтому необходима библиотека стандартов, на которую программа ориентируется в первую очередь, чтобы, руководствуясь стандартами, создавать ТП различных видов деталей.

В соответствии со свойствами обрабатывающих станков и прочего оборудования, а также согласно установленным технологическим регламентам изготовления различного вида деталей, определяется очерёдность выполнения технологических операций. При их моделировании из имеющейся библиотеки происходит подбор оснастки и обрабатывающего инструмента для конкретных параметров детали и потребностей ТП. Такая библиотека должна создаваться инженера-

ми-проектировщиками предприятия в средах автоматического проектирования и размещаться на общем сервере. Для подбора инструмента и оснастки программа обращается к этой библиотеке и ищет в ней необходимые комплектующие.

В случае отсутствия конкретных инструментов создаётся заявка на проектировку требуемых единиц обрабатывающего инструмента и отправляется в отдел проектировки по локальной сети. В такой заявке должны содержаться информация о разновидности, количестве и технологической необходимости инструмента или оснастки, а также отдельный файл обрабатываемой детали. В этом случае программа моделирования ТП переходит в режим ожидания оснастки – проектирование ТП останавливается. Когда необходимая оснастка спроектирована и помещена в библиотеку оснастки, программа на компьютере получает сообщение об этом и продолжает свою работу. В библиотеке каждая единица оснастки должна содержать следующую информацию: вид, параметры, количество, сроки ожидания поставки или изготовления, «загруженность», изношенность. Такая информация нужна для составления карт технологического планирования и расчёта времени ТП изготовления деталей. Перечень материалов, предназначенных для механической и химической обработки, а также покрытия деталей, выделен в отдельную библиотеку.

При проектировании всех технологических операций происходит создание программного кода имеющегося оборудования с ЧПУ и указание его адресов. Программы для конкретных станков создаются в виде отдельных файлов. В процессе моделирования и корректировки ТП эти файлы будут корректироваться. После утверждения ТП все программы будут запущены по локальной сети на соответствующее оборудование, а в случае несоответствия программному коду станка программа будет откорректирована под конкретный станок. Но такое необходимо исключить. Это возможно при указании программного кода станка во время проектирования моделей оборудования цеха и создания в самой программе проектировки ТП модулей, которые

будут переписывать ТП в конкретные программные коды соответствующего оборудования.

По итогу работы программа создаёт несколько основных файлов: маршрутный лист и карту техпланирования заготовки; маршрутный лист, карту техпланирования и ТП изготовления детали; программы для оборудования с ЧПУ.

Все файлы оформляются в соответствии с ГОСТ, ЕСКД и ЕСТД. Поэтому в программе должна быть ещё одна библиотека нормативной документации, согласно которой необходимо оформлять технологические документы и программные коды.

Результаты должны визуализироваться на экране и иметь возможность быть распечатанными. Файлы также должны быть отправлены в общую библиотеку ТП предприятия на общем сервере для их загрузки после запуска производства детали, ТП которой проектировался.

Общая блок-схема алгоритма работы программы представлена на рис. 1, 2.

**Заключение.** Программная реализация данного алгоритма нашла применение в модуле проектирования ТП, позволяющем объединить имеющиеся средства разработки технологии со средствами её управления, а также получить количественные характеристики ТП. Данная программа может быть внедрена на предприятиях машиностроительного, металлообрабатывающего, станкостроительного, ракетно-космического и авиационного комплексов.

#### **Библиографические ссылки**

1. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства / В.М. Зарубин, Н.М. Капустин, В.В. Павлов и др. М.: Машиностроение, 1979. 247 с.

2. Лучкин Н.А., Янишевская А.Г. Разработка информационной системы производственного управления газотранспортного предприятия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6 № 4. С. 154–156.

3. Пергун Е.Н., Янишевская А.Г., Лучкин Н.А. Разработка системы электронного документооборота на предприятиях // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 9. С. 42–46.

## **Уважаемые читатели!**

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 621.865.8

**А.С. Дударев**, канд. техн. наук, доц.

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

fanta88@mail.ru

## МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОЛОМОК МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ В СЭНДВИЧЕВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Описаны методы по предотвращению поломок мелкоразмерного режущего инструмента при выполнении операций перфорации отверстий в многослойных сэндвичевых панелях из полимерных композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, сэндвичевая конструкция, режущий инструмент.

*The cleaning method of the articles surface in the specified range of ultrasonic oscillations is stated. The cleaning is fulfilled by spread of the cleaning fluid continuous vortical stream, that tears off the pollution particles owing to the hydrodynamic abrasive effect and provides increasing of the surface cleaning efficiency.*

**Key words:** ultrasonic oscillations, hydrodynamic abrasive effect, the vortical flow.

В середине XX в. появился новый класс конструкционных материалов – полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые широко применяются в различных отраслях промышленности (авиа-, ракетостроении, судостроении и др.).

ПКМ имеют высокие физико-механические, электроизоляционные, химические и антифрикционные свойства, обладают способностью гасить вибрации, шумы. Из ПКМ можно изготавливать уникальные конструкции изделий, одной из которых является многослойная сэндвичевая панель (рис. 1), обладающая низким удельным весом и значительной жёсткостью.

Снижение шума авиационной техники на местности с помощью звукоизолирующих конструкций возможно на самолётах различного назначения. Из ПКМ на ОАО «Пермский завод “Машиностроитель”» изготавливают звукоизолирующие конструкции для авиадвигателей ПС-90А. В планах Правительства РФ и Департамента авиационной промышленности Министерства промышленности и торговли РФ намечено с 2013–2014 гг. начать производство перспективного двигателя ПД-14 с звукоизолирующими конструкциями из ПКМ.

Звукоизолирующие конструкции (ЗПК) – это сэндвичевые оболочки сложной конфигурации, содержащие области со значительным количеством мелкоразмерных отверстий, которые имеют различное назначение (для поглощения шума – мелкоразмерные отверстия диаметром 1,6–2 мм, для крепёжных элементов от 6,5 мм и др.). В одной ЗПК количество мелкоразмерных отверстий

достигает 200 тыс. ЗПК в разрезе представляют собой сэндвичевую конструкцию: перфорированная поверхность с внутренней стороны и сплошной наружный слой. На рис. 2 приведена перфорированная звукоизолирующая панель.

Причиной ограниченного применения немеханических способов формообразования отверстий в ЗПК (гидравлической струйной и электрофизической обработки) является то, что звукоизолирующие панели представляют собой многослойную ячеистую конструкцию, наружную стенку которой необходимо сохранить целостной, т. е. не допускается стенки панели ЗПК перфорировать насекомыми (см. рис. 2).

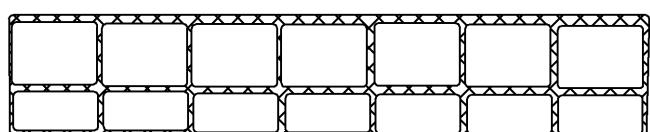


Рис. 1. Фрагмент многослойной сэндвичевой конструкции из полимерного композиционного материала

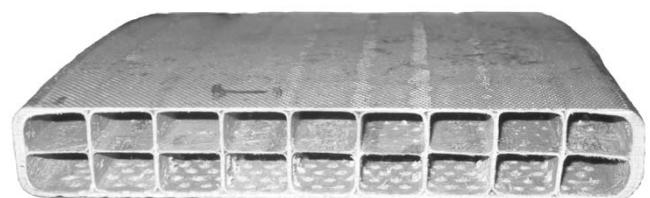


Рис. 2. Элемент звукоизолющей панели двигателя ПС-90А2 (вид с торца)

Во многих отраслях промышленности применяют сверление отверстий в деталях диаметром до 3 мм, получение которых связано с рядом трудностей, главными из которых является поломка режущего инструмента и обработка ПКМ.

Технологические проблемы, возникающие при механической обработке ПКМ следующие:

наличие сколов, разлохмачивание материала в местах входа и выхода инструмента из отверстий из-за низкой адгезионной связи наполнителя со связующим;

сложность получения высокого качества обработанных отверстий ПКМ (необходимой шероховатости) из-за ярко выраженной анизотропии свойств, что требует учёта структуры армирования индивидуальным подбором режимов резания и геометрии инструмента;

низкая теплопроводность материала, в результате чего плохо отводится теплота из зоны резания (инструмент поглощает 80–90 % тепла);

высокие вязкоупругие свойства приводят к усадке отверстий;

абразивное воздействие наполнителя, обусловленное высокой твёрдостью наполнителя и наличием больших площадей контакта по задней поверхности, что приводит к интенсивному износу инструмента;

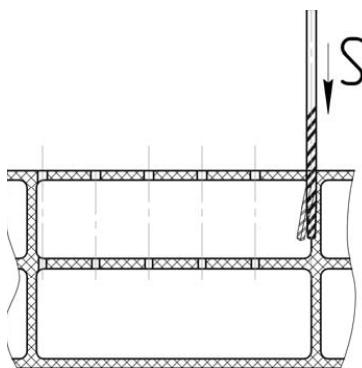


Рис. 3. Вход сверла в перегородку

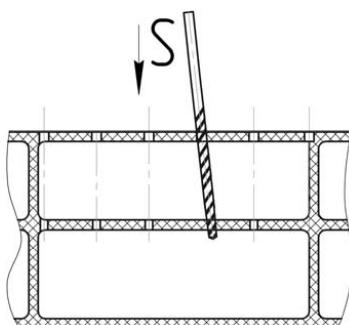


Рис. 4. Защемление сверла между слоями звукопоглощающей конструкции

деструкция полимерного связующего при резании. Под действием механических и тепловых нагрузок происходит химическое разрушение наполнителя ПКМ;

низкая производительность процесса из-за малых скоростей резания, так как ограничено применение СОЖ. Это объясняется тем, что ПКМ обладают свойством влагопоглощения;

специфические требования техники безопасности, связанные с выделением летучих мелкодисперсных частиц ПКМ при резании.

При формообразовании отверстий диаметром 1,6–2,0 мм для поглощения шума в звукопоглощающих панелях применяют ручной труд с использованием пневматических дрелей и лезвийного инструмента.

В связи с вышесказанным вопрос автоматизации процесса перфорации отверстий становится актуальным.

Решением задачи автоматизации перфорации является создание роботизированного комплекса, который описан в работе [1]. В настоящее время проект находится на стадии реализации.

Роботизированный комплекс является универсальным, позволяет выполнять операции перфорации и фрезерования в изделиях типа «многослойные оболочки».

Материалы обрабатываемых изделий – это полимерные композиционные, различные неметаллические (пластмассы, дерево и др.).

В работе [2] отмечено, что процесс сверления мелкоразмерных отверстий (до 3 мм) в различных конструкционных материалах трудно поддаётся автоматизации и механизации. Концевой инструмент диаметрами до 3 мм из быстрорежущих и твёрдых сплавов легко ломается.

В сэндвичевой ЗПК из ПКМ размер окон между ребрами жёсткости 15–20 мм, а расположение ребер жёсткости никак не связано с расположением отверстий, имеющих межосевое расстояние 4,5 мм, т. е. перегородки сэндвичевой панели случайным образом пересекаются с отверстиями. На производстве при попадании сверла в перегородку сэндвичевой конструкции сверло ломается из-за возникновения радиальной силы (рис. 3).

Если при входе в отверстие инструмент подаётся не строго перпендикулярно стенке оболочки звукопоглощающей сэндвичевой конструкции, то происходит защемление сверла между внутренними и наружными слоями ЗПК. При обратном ходе сверло ломается из-за перекоса (рис. 4).

Отметим, что при одностороннем резании величина скручивающего момента, т. е. момента разрушающего стержень сверла, зависит от глубины проникновения сверла в материал заготовки.

ки: чем глубже проникновение, тем больше подверженность инструмента поломке.

Для выпуска конкурентоспособной продукции из ПКМ необходим комплекс мероприятий по оптимизации механической обработки мелкоразмерным инструментом сэндвичевых панелей, где наиболее уязвимым звеном технологической системы является режущий инструмент.

Методы по минимизации поломок режущего инструмента следующие:

адаптивное управление подачей или частотой вращения режущего инструмента для снижения сил резания при попадании в ребро жёсткости;

опережающее (перед формообразованием) ионное просвечивание аналитическими электронными микроскопами конструкций из ПКМ для прогнозирования перегородок сэндвичевой конструкции в месте сверления;

использование нового режущего инструмента из биметаллических сверхпрочных материалов, выдерживающих значительные нагрузки во всех направлениях.

Каждый из этих методов можно применять раздельно или комбинированно.

В работе [3] описаны исследования адаптивного управления (АУ) для решения задач точности, качества и производительности обработки деталей, а также АУ стойкостью режущего инструмента. На основании исследований [3] можно сделать вывод, что использование АУ при дозировании машинной подачи инструмента для предотвращения поломки режущего инструмента является технически выполнимой задачей. При АУ подачей или частотой вращения режущего инструмента постоянно проводится диагностика, т. е. осуществляется мониторинг выбранного технологического параметра текущего режима. В качестве технологического параметра возможно использовать функциональный параметр сверления — осевое усилие, возникающие на инструменте.

При проектировании АУ необходимо выбрать функциональную характеристику процесса сверления — осевое усилие сверла и место размещения его регистрирующего устройства в роботизированном комплексе. На достоверность получаемой информации о величине осевого усилия влияет расположение измерительного устройства в системе робот — привод — инструмент — деталь (РПИД). В качестве функциональной характеристики можно использовать упругие перемещения звеньев системы РПИД. Для объективного выбора той или иной характеристики необходимо знать её отклонение в диапазоне изменения условий обработки при выполнении операций свер-

ления. Эту задачу можно решить аналитически или экспериментально.

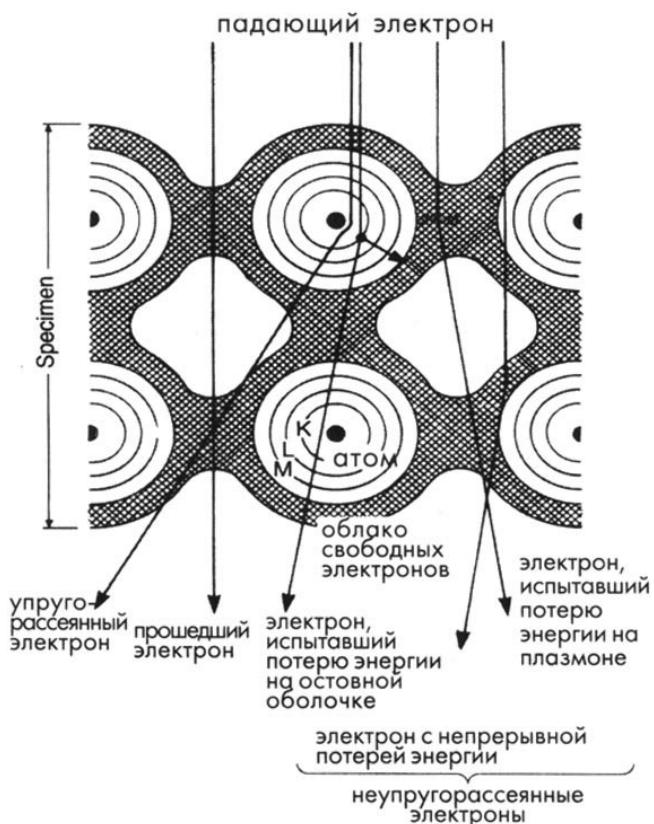
При выборе места установки измерительного устройства его следует располагать максимально близко к месту возникновения динамической настройки в зоне резания, т. е. к месту где быстрее будет получена информация об отклонении. Конструктивно в обратной последовательности системы РПИД режущий инструмент закрепляется в цанговом зажиме, который устанавливается в патрон. Таким образом, чувствительный измерительный элемент должен находиться между цанговым зажимом и патроном моторшпинделя.

При формообразовании отверстий в ЗПК при случайном попадании сверлом в перегородку сэндвичевой конструкции в патроне шпинделя наблюдается кратковременное повышение осевого усилия. При определённом пороговом значении усилия должен срабатывать обратный ход режущего инструмента с переходом на новую координату следующего отверстия в ЗПК, либо АУ замедляет скорость подачи режущего инструмента. Затем цикл должен повторяться.

Наличие рёбер жёсткости в сэндвичевых панелях можно прогнозировать спектроскопией [4]. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ или EELS—Electron Energy Loss Spectroscopy) является, подобно энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС или EDS—Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), наиболее популярным методом аналитической электронной спектроскопии. Ранее считалось, что по сравнению с ЭДС метод СХПЭЭ эффективен только для анализа лёгких элементов и бесполезен для количественного анализа. Однако в последнее время точность анализа методом СХПЭЭ значительно улучшена благодаря повышению характеристик детекторов и использованию в микроскопах электронных пушек с полевой эмиссией. Кроме того на электронные микроскопы устанавливаются системы с фильтрацией электронов по энергии, обеспечивающие получение изображений в режиме энергетической фильтрации. Таким образом, метод СХПЭЭ всё большее применяется на практике.

В настоящее время аналитическая электронная микроскопия [4], как один из экспериментальных методов, привлекает всё большее внимание благодаря высоким характеристикам пространственного разрешения при наблюдении изображений ( $\sim 0,1$  нм) и возможности анализа с помощью нанозонда (диаметром  $\sim 1$  нм).

Принцип взаимодействия электронов с материалами, в том числе с ПКМ, заключается в следующем: электроны, проходящие через фраг-



**Рис. 5. Взаимодействие между падающим электроном и материалом**

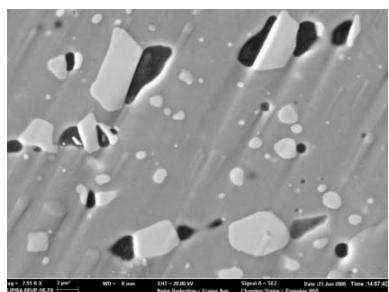
мент детали ПКМ, разделяются на две группы. В одну группу входят просочившиеся электроны, которые не испытали потерю энергии. Другая группа состоит из электронов, неупругорассиянных в результате взаимодействий с материалом (рис. 5).

У мелкоразмерного режущего инструмента из быстрорежущей стали преждевременно выкрашиваются режущие кромки и он подвержен поломке. Частая поломка режущего инструмента связана с развитой карбидной неравномерностью.

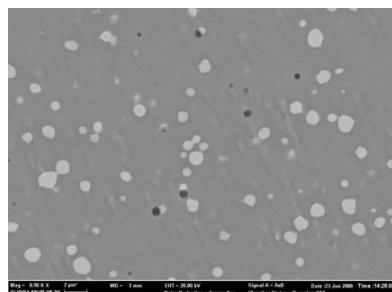
В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПГПУ) совместно с компанией ЗАО «Теком» (г. Санкт-Петербург) в 2011–2012 гг. создан биметаллический материал с равномерной карбидной фазой для инструмента. На рис. 6 приведены фазы биметаллического сплава и стандартной стали.

В СПГПУ совместно с ЗАО «Теком» создан мелкоразмерный инструмент из порошковых материалов с помощью газовой экструзии стали Р6М5. Созданный инструмент по ряду показателей превосходит стандартную сталь Р6М5 ГОСТ 19265–73. Некоторые свойства новой стали приведены в таблице.

Из биметаллических материалов, приведённых в табл., изготовлен режущий инструмент диаметрами 2–6 мм (рис. 7) для обработки отверстий.



a)



б)

**Рис. 6. Карбидная фаза:**  
а – сталь Р6М5 (ГОСТ 19265–73); б – порошковый сплав

#### Свойства быстрорежущей стали Р6М5

Свойства	Новая порошковая сталь	Сталь Р6М5 ГОСТ 19265–73
Предел прочности (изгиб), МПа	4000–6000	1800–3700
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	400–700	200–350
Твёрдость, HRC	65–67	64–66
Трудоёмкость шлифования, чел/ч	0,3	1
Стойкость инструмента, мин	120–360	60



**Рис. 7. Режущий инструмент из биметаллических материалов**

Таким образом, каждый из предложенных методов можно использовать для предотвращения поломок инструмента.

#### **Библиографические ссылки**

1. Дударев А.С., Свищёв В.И., Ломаев В.И. Автоматизация процесса перфорации отверстий в звукоизолирующих панелях авиационных двигателей // Машиностроение и техносфера XXI в.: сб. тр. XV между-

нар. науч.-техн. конф. В 4-х т. Т. 1. Донецк: ДонГТУ, 2008. С. 311–314.

2. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.

3. Адаптивное управление станками [под ред. Б.С. Балакшина]. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.

4. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2006. 256 с.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ**

## **ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ**

**Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов**

2013 г.

Объем 256 с.

Формат 60x88 1/16

ISBN 978-5-94275-607-9

Цена 800 р.



Приведены нормативные материалы, необходимые технологу-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)

УДК 621.977+621.3.088

**В.И. Чижиков**, канд. техн. наук, доц.

(Московский государственный университет приборостроения и информатики)

vichizhikov@gmail.com

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРУГОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ БЕСШАРНИРНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ЭКРАНИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

*Предложено решение поставленной задачи о проектировании упругого кинематического соединения, обеспечивающего управление напряжённо-деформированным состоянием бесшарнирного манипулятора. Упругое соединение построено на основе трубы Бурдона, раскрытие которой в кратчайшее время моделируется заменяющим механизмом. Минимальное время раскрытия определено из решения задачи о брахистохроне.*

**Ключевые слова:** брахистохона, функционал.

*The design task decision of the elastic kinematical connection providing management of the hingeless manipulator stress-strained state is proposed. Elastic connection is constructed on the basis of Burdon's tube which disclosure in the shortest time is modeled by means of the replacing mechanism. The minimum disclosure time is defined from the brachistochrone task solution.*

**Key words:** brachistochrone, functional.

В настоящее время для автоматизации процессов производства элементов микроэлектронной техники широко применяются манипуляторы и роботы на основе упруго деформируемых элементов, выполняющие, кроме операций загрузки и выгрузки, функции контроля, используя небольшие перемещения, погрешность которых может быть ограничена только упругим гистерезисом.

Основу бесшарнирного манипулятора, выполняющего технологические операции в экранированной среде, составляют звенья на базе трубок Бурдона, форма которых зависит от подаваемого давления. Созданное во внутренней полости трубы давление стремится придать поперечному сечению форму окружности – изначально сечение может быть овальным, плоскоovalным, ромбическим или иным, в котором имеются большая и малая полуоси. Вследствие деформации сечения внутренний радиус трубы уменьшается, и внутренние волокна трубы сжимаются. Аналогично внешний радиус увеличивается, а внешние волокна растягиваются. В результате деформации волокон возникает момент внутренних сил, вызывающий распрямление трубы, т. е. увеличение среднего радиуса и уменьшение центрального угла трубы.

Ставится задача проектирования адаптивного пневматического тормозного устройства, инвариантного к изменению параметров и режимов движения исполнительного механизма. Ниже рассмотрено проектирование тормозного устройства, способного парировать внешнюю нагрузку с произвольной характеристикой.

**Постановка задачи.** При раскрытии пружины Бурдона и избыточном давлении в полости конечная точка, расположенная на главной центральной оси, перемещается из начального положения в конечное. При одном и том же избыточном давлении и одинаковой длине главной центральной оси в зависимости от её формы эти перемещения и траектории конечной точки различны. Следовательно, при одной и той же скорости нарастания давления можно подобрать такую форму главной центральной оси, которая обеспечит переход конечной точки из начального положения в конечное за минимальное время. В работе [1] при исследовании кинематики раскрытия пружины Бурдона использован метод обращения движения, при котором ось деформируемой пружины, кривизна которой меняется в процессе перекатывания без скольжения, взаимоогibt профиль оси пружины в конечном деформированном состоянии. Внутреннее избыточное давление при закреплении свободного конца пружины создаёт тяговое усилие, величина и направление которого определяются по методике, изложенной в работе [2]. Направление тягового усилия в общем случае не совпадает с направлением перемещения конечной точки. При снятии закрепления пружина принимает форму, при которой её потенциальная энергия минимальна, т. е. тяговое усилие уравновешивается силой упругости.

Таким образом, рассматриваемое тяговое усилие является потенциальной силой и, следовательно, её действие можно заменить другой по-

тенциальной силой, действующей в требуемом направлении, при условии равенства их элементарных работ на перемещениях, допускаемых кинематическими связями. Реакцию от закрепления будем считать силой, перемещающей свободный (незакреплённый) конец пружины. В такой постановке задачи необходимо обеспечить кратчайшее во времени перемещение катящегося (под действием гравитации) тела между двумя точками, расположенными на разных уровнях и заданном расстоянии. С математической точки зрения такая задача идентична известной вариационной задаче о брахистохроне, но отличается от классической постановки рассмотрением движения тел качения с учётом сопротивлений движению и построением профилей поверхности качения, обеспечивающих движение катящихся тел с заданной длительностью по времени. В качестве дополнительного условия необходимо, чтобы тело качения достигало заданного предельного положения с заданной ограниченной скоростью  $v_0$ . Тяговое усилие по мере раскрытия пружины уменьшается до нуля от максимального значения, определяемого избыточным давлением, и, следовательно, меняется значение потенциальной энергии.

**Вывод дифференциального уравнения качения без скольжения тела вращения.** Качение тел вращения под действием силы веса по наклонным поверхностям происходит обычно без скольжения. При этом тело совершает два взаимосвязанных движения – поступательное вместе с продольной осью симметрии цилиндра и вращательное вокруг этой оси. В задаче рассматриваются приведённые масса и момент инерции, сосредоточенные на оси фиктивного цилиндра. Введём следующие обозначения:  $m$  и  $I$  – масса и момент инерции тела;  $v$  и  $\Omega$  – линейная скорость поступательного движения центра инерции тела и угловая скорость его вращения;  $R$  – радиус наружной цилиндрической поверхности тела;  $a$  – плечо качения тела по основанию;  $y = f(x)$  – функция профиля криволинейного основания, по которому перемещается тело;  $\tg \Psi = -\frac{1}{f'(x)}$  – угловой коэффициент нормали  $NN$  к профилю основания (см. рисунок). Определим кинетическую  $T$  и потенциальную  $\Pi$  энергии тела:

$$T = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\Omega^2}{2} = \frac{1}{2}(mR^2 + I)\Omega^2$$

$$\text{или } T = \frac{1}{2}(m + \frac{I}{R^2})v^2; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Pi &= mg(y + R \sin \Psi) = \\ &= mg \left[ y + R \frac{1}{\sqrt{1 + f'^2(x)}} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v = \Omega R$ .

Обозначим  $S$  перемещение центра инерции тела, численно равное перемещению мгновенного центра поворота тела (или точки касания тела с основанием). При этом

$$v = \frac{dS}{dt} = \sqrt{1 + f'^2(x)} \frac{dx}{dt}.$$

Подставляя эту величину в уравнение (1), преобразуем его к виду

$$T = \frac{1}{2}(m + \frac{I}{R^2}) \left[ 1 + f'^2(x) \right] \left( \frac{dx}{dt} \right)^2. \quad (3)$$

Примем за обобщённую координату  $x$  и определим соответствующую ей силу как коэффициент при обобщённом перемещении  $dx$  и элементарной работе задаваемых силы и пары сил сопротивления качению  $M_c$  на возможном обобщённом элементарном перемещении  $dx$ . Соответствующее приращение ординаты криволинейного основания  $dy = f'(x)dx$  и элементарная работа силы  $G$  запишется в виде

$$A_G = Gdy = Gf'(x)dx. \quad (4)$$

Момент силы сопротивления качению тела

$$M_c = aG \cos(\frac{\pi}{2} - \Psi) = Ga \sin \Psi,$$

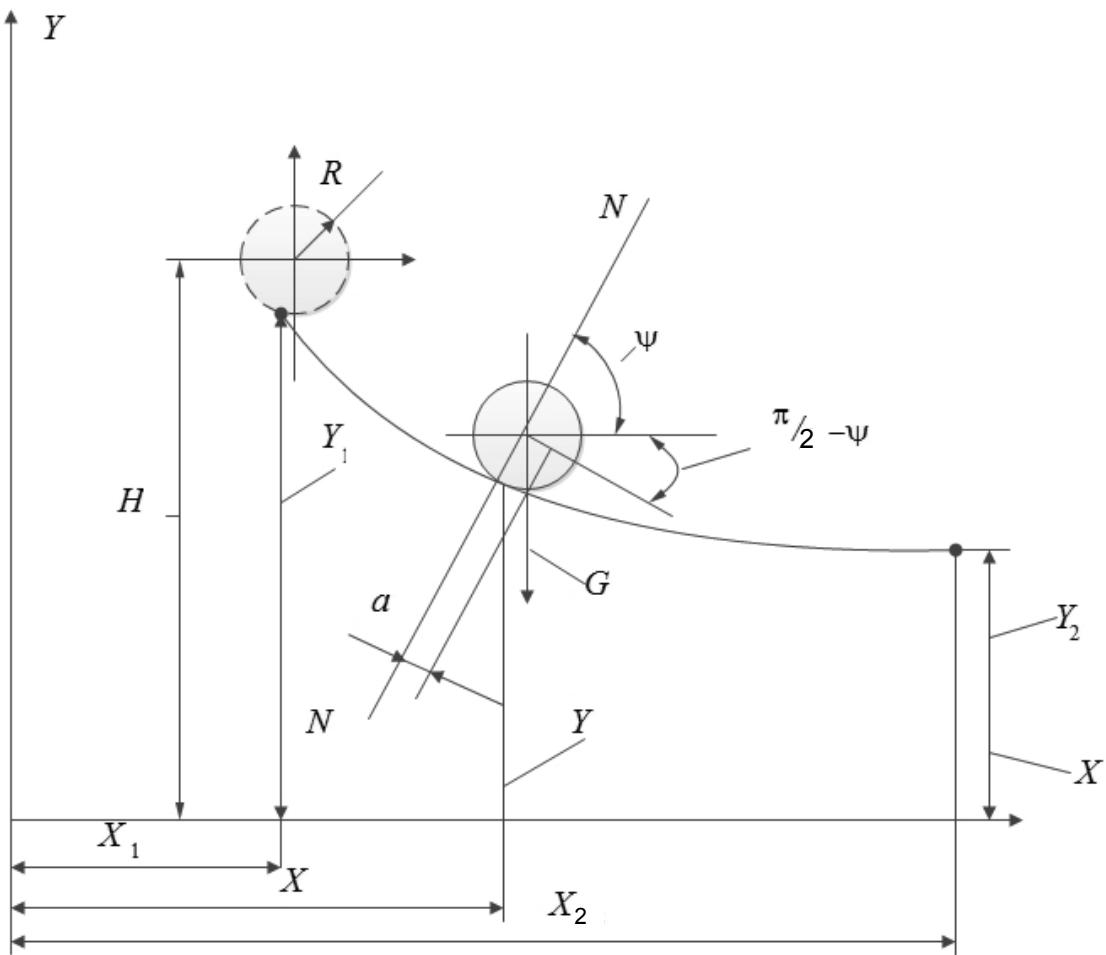
$$\text{где } \sin \Psi = \frac{\tg \Psi}{\pm \sqrt{1 + \tg^2 \Psi}}.$$

Угол  $\Psi$  составлен нормалью  $NN$  к кривой линии и осью  $x$ . Её угловой коэффициент  $\tg \Psi = \frac{-1}{f'(x)}$ . Поэтому  $\sin \Psi = \frac{1}{\pm \sqrt{1 + f'^2(x)}}$ . Элементарный угол поворота  $d\varphi$  тела, соответствующий приращению  $dx$ , имеет вид

$$d\varphi = dS/R = \frac{\sqrt{1 + f'^2(x)} dx}{R}.$$

В соответствии с изложенным выше определим работу момента силы сопротивления качению:

$$A_M = M_c d\varphi = Ga \frac{dx}{R}. \quad (5)$$



**Расчётная схема определения минимального времени раскрытия пружины Бурдона**

Получим суммарную работу внешних сил на элементарном перемещении  $dx$ :

$$A = A_G + A_{M_c} = G \left[ f'(x) + \frac{a}{R} \right] dx, \quad (6)$$

а обобщённая сила, соответствующая координате  $x$ , запишется в виде

$$Q = G \left[ f'(x) + \frac{a}{R} \right]. \quad (7)$$

Составим уравнение Лагранжа второго рода движения тела:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} = Q, \quad (8)$$

где

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = (m + \frac{I}{R^2}) \left[ 1 + f'^2(x) \right] \frac{dx}{dt};$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = (m + \frac{I}{R^2}) f'(x) f''(x) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = mg \left[ f'(x) - \frac{R f'(x) f''(x)}{\left[ 1 + f'(x) \right]^{3/2}} \right].$$

С учётом уравнения (8) получим дифференциальное уравнение

$$(m + \frac{I}{R^2}) \left\{ \left[ 1 + f'^2(x) \right] \frac{d^2 x}{dt^2} - f'(x) f''(x) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \right\} + mg \left[ f'(x) - \frac{R f'(x) f''(x)}{\left[ 1 + f'^2(x) \right]^{3/2}} \right] = mg \left[ f'(x) + \frac{a}{R} \right]. \quad (9)$$

Для этого уравнения известны начальные и граничные условия:

$$\text{при } t = 0 \quad x = x_1, \quad y = y_1, \quad v = 0;$$

$$\text{при } t = T_0 \quad x = x_2, \quad \frac{dx}{dt} = v_0, \quad \frac{d^2x}{dt^2} = 0.$$

**Построение функционала поставленной задачи.**  
Введём обозначения:

$$M = (m + \frac{I}{R^2})[1 + f'^2(x)];$$

$$N = (m + \frac{I}{R^2})f'(x)f''(x);$$

$$P = \left[ -\frac{Rf'(x)f''(x)}{[1 + f'^2(x)]^{3/2}} - \frac{a}{R} \right]$$

и, умножив уравнение (9) на  $2dx = 2\dot{x}dt$ , получим

$$2M\ddot{x}\dot{x}dt - 2(N\dot{x}^2 - P)dx = 0. \quad (10)$$

Полагая  $\dot{x}^2 = z$ , преобразуем уравнение (10) к виду

$$M \frac{dz}{dx} - 2N_z = -2P. \quad (11)$$

Запишем решение обыкновенного линейного неоднородного дифференциального уравнения (11) первого порядка относительно  $\dot{x}^2$ :

$$z = \dot{x}^2 = e^{\int \frac{2N}{M} dx} (C_1 + \int \frac{2P}{M} e^{-2 \int \frac{N}{M} dx} dx), \quad (12)$$

где

$$\int \frac{2N}{M} dx = \int \frac{2f'f''}{1 + f'^2} dx = \int \frac{d(1 + f'^2)}{1 + f'^2} = \ln(1 + f'^2).$$

Постоянная интегрирования  $C_1$  определяется по заданным условиям (см. формулу 25). Так как  $e^{-\ln(1+f'^2)} = \frac{1}{1+f'^2}$ , следовательно,

$$\int \frac{2P}{M} e^{-\int \frac{2N}{M} dx} dx = \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \left\{ -R \int \frac{2f'f'' dx}{(1 + f'^2)^{5/2}} - \right.$$

$$\left. -2 \frac{a}{R} \int \frac{dx}{(1 + f'^2)^2} \right\} = \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \left\{ -R \int (1 + f'^2)^{5/2} df'^2 - \right.$$

$$\left. -2 \frac{a}{R} \int \frac{dx}{(1 + f'^2)^2} \right\}.$$

Подставляя в уравнение (12) полученные величины при  $e^{-\ln(1+f'^2)} = (1 + f'^2)^{-1}$ , определим

$$\dot{x}^2 = (1 + f'^2) \left\{ C_1 + \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \left[ \frac{2}{3} R (1 + f'^2)^{-3/2} - \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \frac{a}{R} \int \frac{dx}{(1 + f'^2)^2} \right] \right\}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что время качения тела вращения по основанию запишется в виде

$$T_0 = \int dt = \int_{x_1}^{x_2} (1 + f'(x))^{-1/2} \left\{ C_1 + \right. \\ \left. + \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \left[ \frac{2}{3} R (1 + f'^2(x))^{-3/2} - \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \frac{a}{R} \int \frac{dx}{(1 + f'^2(x))^2} \right] \right\}^{-1/2} dx. \quad (14)$$

**Уравнение Эйлера для простейшего функционала.** Необходимое условие обращения в минимум простейшего функционала (14) состоит в равенстве нулю его вариации, что приводит к дифференциальному уравнению Эйлера, представленному в развернутой форме:

$$F_y - F_{yx} - F_{yy}y' - F_{yy'}y'' = 0, \quad (15)$$

где подынтегральная функция в уравнении (14) обозначена

$$F = F(y') = (1 + y'^2)^{-1/2} \left\{ C_1 + \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \left[ \frac{2}{3} R (1 + y'^2)^{-3/2} - \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \frac{a_p}{R} \int \frac{dx}{(1 + y'^2)^2} \right] \right\}^{-1/2} dx.$$

Так как  $F_y = F_{y'x} = F_{y'y} = 0$ , следовательно, уравнение (15) упрощается, т. е.

$$F_{y'y} y'' = 0, \quad (16)$$

но в развёрнутом виде уравнение (16) весьма громоздко [3], поэтому в статье не приводится.

Решение интегро-дифференциального уравнения (16) затруднено и возможно лишь приближёнными численными методами, например методом конечных разностей.

**Упрощение функционала (14).** Следует ожидать, что перемещение тел вращения качением сопровождается малым сопротивлением движению, вследствие чего профиль основания скатывания должен отличаться малой кривизной, т. е.  $f'(x) \approx 0$ . При этом уравнение (9) упрощается и имеет вид

$$(m + \frac{I}{R^2}) [1 + f'^2(x)] \frac{d^2x}{dt^2} = mg \frac{a_p}{R}. \quad (17)$$

Решим уравнение (17) относительно  $\frac{d^2x}{dt^2}$ :

$$\ddot{x} = \frac{k}{1 + f'^2(x)}, \quad (18)$$

$$\text{где } k = \frac{mga_p}{(m + \frac{I}{R^2})R}.$$

Умножив обе части уравнения (18) на  $2\dot{x}dt$ , получим

$$2\ddot{x}\dot{x}dt = 2k \frac{\dot{x}dt}{1 + f'^2(x)}. \quad (19)$$

Но  $2\ddot{x}\dot{x} dt$  и  $\dot{x}dt = \frac{dx}{dt}dt = dx$ , поэтому уравнение (19) преобразуется к виду

$$d(\dot{x}^2) = 2k \frac{dx}{1 + f'^2(x)}. \quad (20)$$

Интегрируя уравнение (20), находим

$$\dot{x}^2 = 2k \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)} \text{ и } \frac{dx}{dt} = \sqrt{2K \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)}}.$$

Тогда получаем

$$dt = \frac{dx}{\sqrt{2K \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)}}}.$$

Время движения тела качения по основанию после интегрирования последнего равенства определим из следующего выражения:

$$T_0 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{2K \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)}}} = \int_{x_1}^{x_2} F(y') dx, \quad (21)$$

где  $F(y') = \left[ 2K \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)} \right]^{-1/2}$  является подынтегральной функцией функционала (21), для которого уравнение Эйлера сохраняет вид уравнения (15).

Существенные упрощения частной производной  $F_{y'y}$ , показанные в работе [3], не снимают значительных трудностей решения интегро-дифференциального уравнения (16), поэтому получение решения в замкнутой форме невозможно.

Таким образом, при вычислении частных производных функции  $F(y')$  предполагалось, что функции  $f(x)$  существуют и непрерывны с производными до 2-го порядка включительно, — это позволило переставить операции интегрирования и дифференцирования. Определение минимума функционала предпочтительнее осуществлять по условию Лагранжа: если  $F_{y'y} \geq 0$ , то функционал (14) или (21) имеет минимум, если  $F_{y'y} \leq 0$  — максимум.

**Алгоритм упрощённого приближённого решения задачи.** Ниже предложен вариант приближённого решения поставленной задачи, так как невозможно вычислить классическими методами вариационного исчисления минимум функционала в уравнениях (14) и (21).

Предварительно заметим, что поставленное выше условие ограничения скорости движения тела (раскрытия пружины) в конечной точке пути величиной  $v_0$  и равенстве нулю скорости в начальной точке предопределяет форму профиля траектории раскрытия, которую должны иметь участки разгона и торможения.

Среди простейших гладких линий такой формой могут отличаться отрезки кривых линий второго порядка (параболы, гиперболы, эллипса и окружности), надлежащим образом ориентированные относительно выбранной системы декартовых координат, и другие кривые линии. Рассмотрим приближённое решение задачи по следующему алгоритму:

выбрать подходящие кривые линии и записать их уравнения в принятой системе координат  $y = f(x)$ , приняв алгебраические обозначения коэффициентов;

определить производные  $f'(x)$  и  $f''(x)$  и подставить в уравнение (9);

решить уравнение (9), определяя функцию  $x = x(t)$ ;

определить коэффициенты (параметры) функции  $f(x)$  по начальным и граничным условиям;

вычислить производные  $f'(x)$ ,  $f''(x)$  и  $\frac{d^2x}{dt^2}$ , подставить их в уравнения (14) или (21) и вычислить величины  $T_0$ ;

определить предпочтительную функцию  $f(x)$  на основании сравнения вычисленных величин  $T_0$ .

**Пример.** Проиллюстрируем разработанный выше алгоритм на конкретном примере. Выберем параболу и составим её уравнение относительно введённой системы координат так, чтобы её отрезок, принятый для профилирования траектории, удовлетворял поставленным условиям. Для этого пригодна общая форма уравнения параболы  $y = Ax^2 + Bx + C$ . Определив производные  $y' = 2Ax + B$ ,  $y'' = 2A$ , подставим их в уравнение (9). Допущение пологого профиля основания позволяет упростить уравнение, предположив, что  $f''(x) = 0$ , т. е.

$$(m + \frac{I}{R^2})(4A^2x^2 + 1 + 4AB + B^2)\frac{d^2x}{dt^2} = mg\frac{a}{R}. \quad (22)$$

Умножив уравнение (22) на  $2\dot{x}dt$ , приведём его к виду

$$\begin{aligned} (m + \frac{I}{R^2})(4A^2x^2 + 1 + 4AB + B^2)d\dot{x}^2 &= \\ = 2mg\frac{a}{R}dx. \end{aligned} \quad (23)$$

После интегрирования уравнения (23) имеем

$$\int dx^2 = \frac{2mga}{R(m + \frac{I}{R^2})} \int \frac{dx}{4A^2x^2 + 1 + 4AB + B^2}.$$

Отсюда

$$\dot{x} = \pm \sqrt{\frac{2K}{1 + 4AB + B^2}} \arctg \frac{4A^2x}{1 + 4AB + B^2} + C_1, \quad (24)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, которая определяется по условию  $\dot{x} = v_0$  при  $x = x_0$

$$\text{или } C_1 = v_0^2 - \frac{2K}{1 + 4AB + B^2} \arctg \frac{4A^2x_0}{1 + 4AB + B^2}. \quad (25)$$

В результате интегрирования уравнения (24) получим равенство

$$T_0 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{\frac{2K}{1 + 4AB + B^2} \arctg \frac{4A^2x}{1 + 4AB + B^2} + C_1}}. \quad (26)$$

Интеграл, содержащийся в правой части уравнения (26), может быть вычислен приближённо. Для этого необходимо знать коэффициенты  $A$  и  $B$ , т. е. форму параболы.

Определим коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Ордината  $y_1$  определяется согласно выбору системы координат и соответствует линии контакта с началом траектории фиктивного цилиндра с его характеристиками.

Ордината  $y_2$  зависит от ординаты  $y_1$ , сопротивления движения тела качения по основанию и скорости тела в конце пути. Работа силы веса тела при свободном движении определяется произведением  $G(y_1 - y_2)$ . Работа сил сопротивления качению тела, имитирующая работу сил упругости пружины, приблизительно равна  $2G a_p \frac{x_2 - x_1}{D}$ . Для обеспечения требуемой скорости в конце пути работа силы веса должна превосходить работу сопротивления качению.

$$\text{Если } (y_1 - y_2) = 1,2 \frac{2G a_p (x_2 - x_1)}{D},$$

$$\text{то } y_2 = y_1 - 2,4 \frac{(x_2 - x_1)}{D} a_p. \quad (27)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$ , входящие в уравнение параболы, определим по координатам начальной и конечной точек основания и скорости в начале пути:

$$y_1 = Ax_1^2 + Bx_1 + C; y_2 = Ax_2^2 + Bx_2 + C;$$

$$\frac{2K}{1 + 4AB + B^2} \arctg \frac{4A^2x_1}{1 + 4AB + B^2} + C_1 = 0 \quad (28)$$

Из первых двух уравнений (28) исключаем коэффициент  $C$  и получаем уравнение относительно одного из коэффициентов, например:

$$B = (x_1 - x_2)^{-1} [y_1 - y_2 - A(x_1^2 - x_2^2)]. \quad (29)$$

Подставляя уравнение (29) в третье уравнение (28), приходим к трансцендентному уравнению относительно коэффициента  $A$ . Затем определяем коэффициент  $A$  и в обратном порядке –  $B$  и  $C$ . При этом постоянная  $C_1$  определена уравнением (25). Далее по уравнению (26) вычисляется  $T_0$ . Аналогично можно вычислить  $T_0$  для других кривых линий и таким образом реализовать приведённый выше алгоритм.

Соответствие скорости  $v_0$  заданному значению устанавливается вычислением уравнений (13) (точно) или (24) (приближённо). При недопустимом расхождении изменяется числовой коэффициент в равенстве (27), после чего процедура вычислений повторяется.

Следующим этапом решения поставленной задачи синтеза тормозного устройства на основе упругого кинематического соединения является связь параметров его физической модели, реализованной с помощью заменяющего механизма, который можно получить, соединив вращательной парой катящийся цилиндр со стержнем, совершающим поступательное перемещение относительно качающегося кулисного камня [4]. Нижняя часть стержня, имеющая связь с пружиной на поступательном перемещении  $s$ , гасит кинетическую энергию скользящего цилиндра. Через угол качания кулисного камня  $\phi(t)$  и перемещение  $s$  подвижной части тормозного устройства, которые являются его параметрами, можно метрически синтезировать принятую модель упругого кинематического соединения.

Общая работа по раскрытию пружины определяется работой газа  $A_f = \int_{v_0}^{v_k} pdV = \int_{f_0}^{f_k} pR_l dF = A_d$ , которая является работой движущих сил [5]. В равенстве приняты обозначения параметров:  $R_l$  – длина главной центральной оси пружины Бурдона, а  $dF$  – приращение её площади попечного сечения. При этом разность  $A_l - A_c = \Delta E$  – это приращение кинетической энергии, которая уравновешивается потенциальной энергией упругого кинематического соединения. Рассмотрим общий случай, в котором учитывается нелинейная характеристика силы  $f(s)$ , нагружающей упругое соединение. Выражение кинетической энергии скользящего цилиндра имеет вид

$$E = \frac{1}{2}(m + \frac{I}{R^2})v^2. \quad (30)$$

Выберем за начало отсчёта времени мгновение нулевого отклонения упругой кинематической связи, когда перемещение  $s = 0$  и скорость  $v = 0$ .

Тогда получим

$$\int_0^{v_k} (m + \frac{I}{R^2})vdv = \int_0^{s_k} f(s)ds$$

или

$$\frac{1}{2}(m + \frac{I}{R^2})v^2 = \int_0^s f(s)ds \quad (31)$$

Это соотношение выражает закон сохранения энергии: в левой части стоит кинетическая энергия, накопленная в процессе раскрытия пружины из крайнего положения ( $s = 0, v = 0$ ) вследствие наполнения её полости газом к текущему положению ( $s = s_k, v = v_k$ ), а в правой части – потенциальная энергия, приобретённая в процессе того же движения. Следует учесть, что перемещение подвижной точки пружины  $s = s(x, y)$  [1, 5] в упругой связи выражается через координаты  $XOY$ , связанной с катящимся цилиндром. Нелинейная величина  $f(s)$  парирует возмущение на любом отрезке  $s, s_k$ . Следовательно, пределы интегрирования в уравнении (31) должны иметь упомянутые значения. Из выражения (31) находим

$$v = \frac{ds}{dt} = \sqrt{\frac{2}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)} \sqrt{\int_0^{s_k} f(s)ds}}.$$

Интегрирование данного уравнения определяет время  $T_{c0}$  как функцию перемещения  $s$ :

$$T_{c0} = \sqrt{\frac{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)}{2}} \int_0^{s_k} \frac{ds}{\sqrt{\int_{s_0}^{s_k} f(s)ds}}. \quad (32)$$

Предположим,

$$T_0 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{2K \int \frac{dx}{1 + f'^2(x)}}} = \int_{x_1}^{x_2} F(y')dx, \quad (33)$$

что является результатом решения задачи о брахистохроне. В уравнении (33) имеем следующее:  $y = f(x)$  – функция профиля криволинейного основания,

$$K = \frac{mga_p}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)R},$$

где  $a_p$  – плечо скользования цилиндра;  $m, I, R$  – масса, момент инерции цилиндра и его радиус.

Требуется подобрать характеристику  $f(s)$ , которая способна парировать упомянутые возмущения за время  $T_0$ . Остановимся на симметричной характеристике, описываемой законом

$$f(s) = as^{2n-1} \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Интегрируя последовательно, находим

$$\int_{s_0}^{s_k} f(s) ds = \frac{as^{2n}}{2n} \Big|_{s_0}^{s_k} = \frac{a}{2n} (s_k^{2n} - s_0^{2n});$$

$$\int_0^{s_k} \frac{ds}{\sqrt{\frac{a}{2n}(s_k^{2n} - s^{2n})}} = \sqrt{\frac{2n}{a}} \frac{1}{s_k^{n-1}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{1-u^{2n}}},$$

где  $u = \frac{s}{s_k}$ ;

$$T_{c0} = \sqrt{\frac{2\left(m + \frac{I}{R^2}\right)n}{a}} \frac{1}{s_k^{n-1}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{1-u^{2n}}}. \quad (34)$$

Отсюда видно, что только при  $n = 1$  (линейная характеристика) время  $T_{c0} = T_0$  не зависит от амплитуды перемещения, а в остальных случаях существует связь между периодом перемещения и амплитудой.

Рассмотрим в качестве примера перемещение в упругом соединении с кубической характеристикой  $f(s) = as^3$ . Тогда  $n = 2$ , и из выражения (34) определяем

$$T_{c0} = \sqrt{\frac{2\left(m + \frac{I}{R^2}\right)}{a}} \frac{1}{s_k} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{1-u^4}}.$$

Входящий сюда эллиптический интеграл вычисляется с помощью таблиц функций, из которых находим, что интеграл равен  $\frac{1,8541}{\sqrt{2}}$ .

Следовательно,

$$T_{c0} = \frac{1}{s_k} \sqrt{\frac{2\left(m + \frac{I}{R^2}\right)}{a}} \cdot \frac{1,8541}{\sqrt{2}},$$

Из данного выражения нетрудно определить коэффициент  $a$ , входящий в характеристику упругого кинематического соединения.

Для собственной частоты пружины получим

$$p = \frac{2\pi}{T_{c0}} = 3,3871 s_k \sqrt{\frac{a}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)}}, \quad (35)$$

т. е. частота линейно увеличивается с ростом амплитуды перемещения.

Таким образом, получено точное решение для модели раскрытия упругого кинематического соединения, в которой минимальное время определено решением задачи о брахистохроне качения цилиндра по поверхности с сопротивлением качению. Работа внешних сил и сил сопротивления, приведённых к цилинду, парируется работой упругих сил кинематического соединения с характеристикой, которая может быть определена из выражений (34) и (35).

**Метрический синтез** модели упругого кинематического соединения проводится в следующей последовательности. Известными, как приведено выше, являются параметры  $f(t)$  – угол между хордами пружины Бурдона в раскрытом и нераскрытом состояниях;  $s$  – перемещение подвижной части пружины. Соединяя точки касания цилиндра в начальном и конечном положениях отрезком  $L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ . Под углом  $(90^\circ - f(t))$  к отрезку  $L$  в точке с координатами  $(x_1, y_1)$  проводим прямую до пересечения с прямой, проведённой из точки с координатами  $(x_2, y_2)$  под углом  $90^\circ$  к тому же отрезку. Через три полученные точки можно провести окружность и поместить на ней ось вращения кулисного камня. Обозначив  $O_M$  центр вращения кулисного камня, а точки касания цилиндра в начальном и конечном положениях с соответствующими координатами  $M_1$  и  $M_2$ , получим следующее соотношение:

$$s = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\sin(f(t))} - \frac{1}{\tan(f(t))} \right).$$

Введём коэффициент  $K = \frac{180^\circ + (f(t))}{180^\circ - (f(t))}$ , характеризующий размещение точки  $O_M$  на окружности. При  $K = 1$  скатывание цилиндра невозможно, следовательно  $s = 1$ . Таким образом, введённый коэффициент всегда должен быть больше единицы, т. е.  $f(t) = 180^\circ \frac{K-1}{K+1}$ .

**Выводы.** Впервые предложена физическая модель упругого кинематического соединения на основе трубки Бурдона для манипулятора, выполняющего технологические операции в экранированной среде. Модель построена на основе заменяющего механизма, в котором ведущим звеном является скатывающийся цилиндр, соединённый вращательной парой со стержнем и совершающий поступательное перемещение относительно качающегося кулисного камня с осью вращения на стойке.

Впервые на основе решения задачи о брахистохроне определено время парирования внешнего возмущения, параметры которого приведены к подвижной точке упругого кинематического со-

единения в конструкции манипулятора, у которого отсутствуют кинематические пары, имеющие износ вследствие относительного перемещения звеньев. Управление перемещением конструкции основано на её управлении напряжённо-деформированным состоянием, которое обеспечивается избыточным давлением газа в полостях пружин, выполняющих роль упругих кинематических соединений жёстких элементов манипулятора.

Предложен алгоритм упрощённого решения задачи о брахистохроне, который учитывает особенности, связанные с подбором траектории скользования цилиндра и его конечной скоростью.

По найденному времени определяется характеристика  $f(s)$  упругого элемента, способного парировать внешнее возмущение.

Проведён метрический синтез параметров модели упругого кинематического соединения. Введён параметр, связывающий характеристики заменяющего механизма и проектируемого упругого кинематического соединения.

### **Библиографические ссылки**

1. Чижиков В.И. Кинематика раскрытия пружины Бурдона // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 20–26.
2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
3. Чижиков В.И. Задача о брахистохроне для тел качения в определении формы главной центральной оси пружины Бурдона // Вестник МГУПИ. 2011. № 32. С. 40–51.
4. Чижиков В.И. Управление напряжённо-деформированным состоянием многомерной конструкции с управляемыми упругими кинематическими соединениями с неопределенной закономерностью внешнего воздействия // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информационных технологий: науч. тр. XV междунар. науч.-практич. конф. (г. Ларнака, Кипр, 30.09–5.10.2012 г.). М.: МГУПИ, 2012. С. 107–112.
5. Чижиков В.И. Тормозное устройство на основе трубки Бурдона в следящем пневмоприводе // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 7. С. 30–36.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ**

## **ВВЕДЕНИЕ В УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

**Е.И. Тавер**

2012 г.      Объем 368 с.      Формат 60x88 1/16      ISBN 978-5-94275-666-6      Цена 600 р.



Качество товаров рассмотрено, с одной стороны, как важнейший результат производственной деятельности, а с другой — как особый объект управления. При этом состав, нормативные и физические значения показателей качества товара и факторов, от которых оно зависит, являются конечным объектом управления. Даны субъекты управления качеством, универсальные подходы к нему, измерения, оценки, подтверждение соответствия и контроль качества, правовые основы, стандарты и модели управления качеством. Исходя из этого, проведен анализ задач и методов управления качеством при маркетинге, проектировании, производстве и использовании товара, а также затрат на качество.

Допущено УМО по образованию в области прикладной математики и управления качеством в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 220501 – Управление качеством и направлению 221400 – Управление качеством.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Строгановский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)



УДК 004.896

**И.И. Лавреш**, канд. техн. наук

(Сыктывкарский лесной институт (филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова))

i.i.lavresh@cit.rkomi.ru

## **САМООРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И МЕРА СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ СУБЬЕКТА И ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА**

*Рассмотрены задачи теории систем, связанных с особенностью понятия «самоорганизация» применительно к элементам искусственных систем. Описана мера согласования интересов субъекта и объекта управления или подведомственного объекта на основе матричного метода.*

**Ключевые слова:** самоорганизация искусственных систем, ранжировка показателей, мера согласования интересов.

*The systems theory tasks connected with the “Self-organization” concept feature with regard to artificial systems elements are considered. Interest coordination measure of management subject and object or subordinated object from the matrix method is described.*

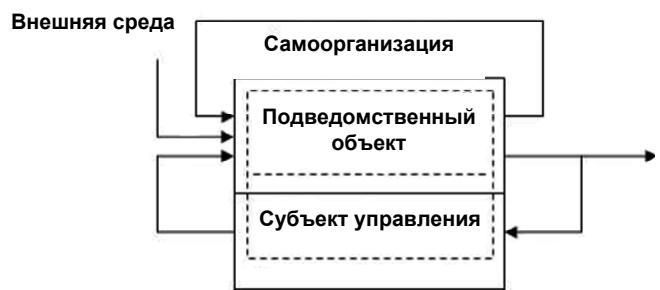
**Key words:** artificial systems self-organization, indices regulating, interest coordination measure.

**Введение.** Самоорганизация подведомственного объекта – это такой вид действий значительной части его элементов и объекта в целом, который направлен на стихийное обеспечение их собственных интересов, затрагивающих качество выполнения решений субъекта управления и способных изменить эффект управления системой. В конце XX в. термин самоорганизация заменил использовавшийся ранее термин самоуправление [1].

Можно подчеркнуть следующие особенности процесса самоорганизации. Во-первых, это стихийный процесс, т. е. процесс, у которого отсутствуют признаки централизованной организации действий. Во-вторых, стихийные действия по отстаиванию своих интересов элементов подведомственного объекта могут изменять эффект управления. В-третьих, к самоорганизации относятся лишь действия, связанные непосредственно с выполнением решений субъекта управления. В-четвёртых, к самоорганизации относятся лишь действия настолько значительной доли элементов подведомственного объекта, что они могут оказаться на эффекте управления. Другими словами, действия малого числа индивидуумов, отличные от действий остальных, входящих в состав подведомственного объекта, не должны приниматься во внимание при оценке влияния самоорганизации на эффективность управления. Свойства самоорганизации приведены в работе [2].

**Основная часть.** В работе [3] приведена поправка к теории систем, сводящаяся к замене ранее принятой макромодели организационных систем на модель, представленную на рис. 1.

По сравнению с обычной моделью здесь представлен ещё один контур – самоорганизации подведомственного объекта, а наличие двойной линии (сплошной и пунктирной) символизирует размытость границ системы с внешней средой и между объектом и субъектом управления (подведомственным объектом). В связи с феноменом самоорганизации появляется следующая задача теории: выбор меры согласования (рассогласования) механизмов самоорганизации и интересов субъекта управления. Остановимся на её решении.



**Рис. 1. Модель искусственной системы**

В 70-х гг. XX в. американский ученый К.Дж. Эрроу доказал теорему о возможностях [4]. Доказано, что при выполнении четырёх аксиом, сформулированных им, и выполнении требований асимметрии и транзитивности индивидуальных предпочтений, при числе элементов множества не менее 3-х и числе индивидуумов не менее 2-х, не существует групповой ранжировки, с которой было бы согласовано простое большинство. Три из четырёх аксиом бесспорны. Одна из них при определённых условиях не кажется абсолютно бесспорной. Но она перестаёт быть бесспорной, если принять во внимание меру различия предпочтений в разных парах. А это значит, что потребуется каким-то образом вводить меру предпочтения, что, в свою очередь вынудит обратиться к приёмам теории полезности построения функции полезности. Построение функции полезности сопряжено с неустранимой субъективностью полученной функции полезности. Значит, необходимо согласовывать мнение разных индивидуумов относительно функции полезности элементов множества  $A$ . Получился замкнутый логический круг.

С момента опубликования теоремы о возможностях учёные в области коллективного выбора пытаются получить результаты, смягчающие выводы К.Дж. Эрроу. Но все известные методы имеют недостатки, не позволяющие выделить из них бесспорного лидера по всем известным в этой области критериям.

Остановимся на методе, предложенном Т.П. Скринской [5], отвечающим трём бесспорным аксиомам Эрроу и требованиям асимметрии и транзитивности индивидуальных предпочтений. Автор утверждает, что этот метод наиболее защищён от манипулирования коллективным выбором, т. е. осознанным искажением результатов коллективного выбора за счёт специальных мер.

Суть метода состоит в следующем.

1. Субъект управления формирует множество  $A$  и даёт свою ранжировку  $V_{c,y}$  элементов из  $A$ .
2. Каждый индивидуум, участвующий в социологическом опросе из состава подведомственного объекта, имеет индивидуальную ранжировку  $V_j$ , ( $j$  – условный номер индивидуума, элементов множества  $A$ ).
3. На основе совокупности ранжировок  $V_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  строится орграф группового предпочтения (элементов множества  $A$ ).
4. Орграфу группового предпочтения ставится в соответствие орграф-конденсация.

5. Итоговое групповое предпочтение – это ранжировка, соответствующая орграфу-конденсации.
- Пусть выполнены пп. 1 и 2 и получена совокупность индивидуальных ранжировок  $V_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Число таких ранжировок должно отвечать требованиям эффективности опроса, репрезентативности выборки и т. д.

Пункт 3 выполняется следующим образом.

Число возможных вершин орграфа группового предпочтения равно мощности множества  $A$ . Пусть  $|A| = m$ , т. е. число элементов (показателей оценки решений субъекта управления и интересов подведомственного объекта) равно числу  $m$ . Примем число агрегированных показателей субъекта управления равным 7, тогда  $m \geq 7$ . Числа  $m$  и  $n$  между собой не связаны. Предельное число дуг в орграфе группового предпочтения равно  $m(m - 1)$ : вершина орграфа может быть связана со всеми остальными.

Дугами орграфа группового предпочтения будем отображать наличие (или отсутствие) предпочтения в паре вершин с номерами  $i, t$ : пара  $\{i, t\}$ ,  $i$  – номер вершины (номер показателя из  $A$ ),  $t$  – то же самое,  $i = \overline{1, m}$ ,  $t = \overline{1, m}$ . Если группа индивидуумов считает, что  $i$ -й показатель предпочтительнее  $t$ -го показателя, то этот факт регистрируется следующими способами:

- а) символично  $(i, t) \in D$ , где  $D$  – множество дуг орграфа группового предпочтения. Это значит, что  $i$ -й показатель предпочтительнее  $t$ -го показателя ( $f_i > f_t$ );
- б) графически (рис. 2)

- в) алгебраически: в матрице смежности орграфа на пересечении  $i$ -й строки и  $t$ -го столбца ставится 1.

Допускается, что ни пара  $(i, t)$  и ни пара  $(t, i)$  не наберут большее число голосов индивидуумов, т. е. одинаковое число индивидуумов считает, что  $f_i > f_t$  и  $f_t > f_i$ . В теории полезности подобная ситуация квалифицируется как безразличие, т. е.  $f_i \sim f_t$  в символном виде, графически – наличие дуг обоих направлений между  $i$  и  $t$  (рис. 3), алгебраически – в  $i$ -й строке и  $t$ -м столбце ставится 1, а в  $t$ -й строке и  $i$ -м столбце – 1.



Рис. 2. Иллюстрация графического отображения строгого предпочтения

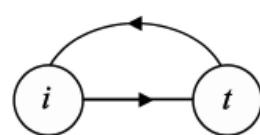


Рис. 3. Иллюстрация графического отображения безразличия

Обозначим через  $\eta_{it}$  – число индивидуумов с номерами  $j$ , у которых в ранжировке  $V_j$   $i$ -й элемент из  $A$  предпочтительнее элемента с номером  $t$ . Тогда элемент матрицы смежности орграфа группового предпочтения  $s_{it}$  запишется в виде

$$s_{it} = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_{it} > \eta_{ti} \text{ или } \eta_{it} = \eta_{ti}, \\ 0, & \text{если } \eta_{it} < \eta_{ti}. \end{cases} \quad (1)$$

соответственно,

$$s_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_{ti} > \eta_{it} \text{ или } \eta_{it} = \eta_{ti}, \\ 0, & \text{если } \eta_{ti} < \eta_{it}. \end{cases} \quad (2)$$

Обозначим  $\varepsilon_{it}$  – меру согласования групп из  $n$  индивидуумов с элементами матрицы смежности  $s_{it}$ :

$$\varepsilon_{it} = \begin{cases} (\eta_{it} / n)100\%, & \text{если } \eta_{it} \neq 0, \\ 100\%, & \text{если } \eta_{it} = \eta_{ti}. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда для любой совокупности из  $n$  индивидуальных ранжировок  $V_j$  множества сравнения  $A = X\{i, i = \overline{1, m}\}$  будут иметь место следующие результаты анализа мнения группы в целом:

а) в каждой неупорядоченной паре  $\{i, t\}$  номеров показателей, описывающих систему ценностей элементов подвластенного объекта, либо  $s_{it} = 1$ , а  $s_{ti} = 0$  и либо  $\varepsilon_{it} > \varepsilon_{ti}$ , либо  $\varepsilon_{ti} > \varepsilon_{it}$ ;

б) для некоторых неупорядоченных пар  $\{i, t\}$   $\eta_{it} = \eta_{ti}$ ,  $s_{it} = 1$ ,  $s_{ti} = 1$ , и  $\varepsilon_{it} = \varepsilon_{ti} = 100\%$ ; для остальных пар имеет место случай «а».

При этом графически в случае «а» между элементами  $i$  и  $t$  проводится одна дуга (см. рис. 2). Для случая «б» между безразличными элементами из  $A$  проводятся две дуги разного направления (см. рис. 3).

Примером орграфа группового предпочтения на множестве  $A$ , состоящем из шести элементов, т. е.  $m = |A| = 6, i = \overline{1, 6}$ , может быть орграф (рис. 4) при  $n = 100$ .

Пусть

$$\begin{aligned} \eta_{12} &= 80; \eta_{13} = 25; \eta_{14} = 75; \eta_{15} = 80; \eta_{16} = 70; \\ \eta_{21} &= 20; \eta_{23} = 66; \eta_{24} = 70; \eta_{25} = 62; \eta_{26} = 80; \\ \eta_{31} &= 75; \eta_{32} = 34; \eta_{34} = 67; \eta_{35} = 70; \eta_{36} = 70; \\ \eta_{41} &= 25; \eta_{42} = 30; \eta_{43} = 33; \eta_{45} = 30; \eta_{46} = 70; \\ \eta_{51} &= 20; \eta_{52} = 38; \eta_{53} = 30; \eta_{54} = 30; \eta_{46} = 62; \\ \eta_{61} &= 75; \eta_{62} = 34; \eta_{63} = 67; \eta_{64} = 70; \eta_{65} = 70. \end{aligned}$$

Соответственно матрица смежности орграфа группового предпочтения имеет вид (см. таблицу).

Из приведённого примера видно, что в групповом предпочтении нарушено требование транзитивности:  $f_1 > f_2 > f_3$ , и  $f_3 > f_1$ , а также требова-

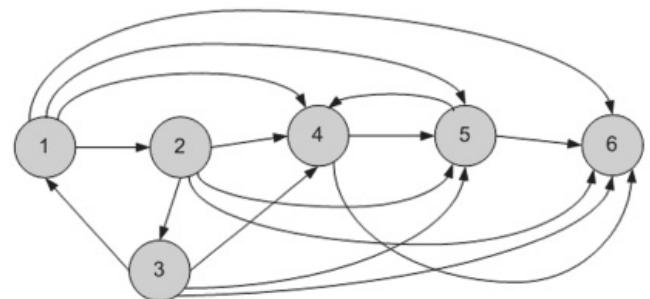


Рис. 4. Гипотетический орграф группового предпочтения

#### Матрица смежности

$i \backslash t$	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1
3	1	0	0	1	1	1
4	1	0	0	0	1	1
5	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0	0

ние асимметрии:  $f_4 > f_5$ , и  $f_5 > f_4$ . Требование асимметрии нарушено опосредованно и в парах  $\{f_1, f_2\}, \{f_1, f_3\}, \{f_2, f_3\}$ , ибо в конечном итоге с позиции группы получается, что показатель  $f_1$  должен быть предпочтительнее показателя  $f_3$ , так как имеется последовательность предпочтений:  $f_1 > f_2, f_2 > f_3$  (опосредованная точка зрения). Однако непосредственно 75 % группы считает  $f_3 > f_1$ .

Для устранения формальных противоречий выполняются пп. 4 и 5 (строится орграф-конденсация орграфа группового предпочтения).

Орграф-конденсация исходного орграфа получается выполнением следующих операций [5]:

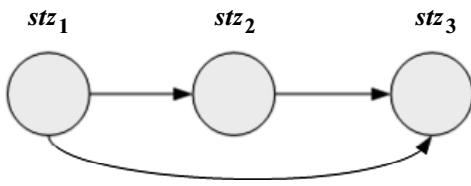
а) вычисляются сильные компоненты, обозначаемые далее как  $stz_k$ ,  $1 \leq k \leq n$ ;

б) сильные компоненты соединяются одной дугой из всех возможных между вершинами исходного орграфа.

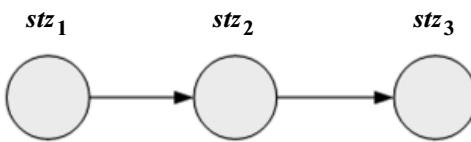
В качестве меры группового согласования выбирается наименьшее из уровней согласования  $\varepsilon_{it}$  для исходного орграфа.

**Сильный компонент** исходного орграфа – это подмножество его вершин, взаимодостигимых друг для друга.

Одна любая вершина по определению считается достижимой сама для себя. Выделение сильных компонентов осуществляется соответствующим алгоритмом.



**Рис. 5. Орграф-конденсация орграфа, приведённого на рис. 4**



**Рис. 6. Иллюстрация нестрогого порядка**

Три сильных компонента имеют вид:

$$stz_1 = \{f_1, f_2, f_3\}, stz_2 = \{f_4, f_5\}, stz_3 = \{f_3\}.$$

Графически орграф-конденсация имеет вид, представленный на рис. 5.

В работе [5] доказано, что

- 1) для любого орграфа орграф-конденсация единственный;
- 2) в орграфе-конденсации каждая вершина исходного орграфа входит только и только в один сильный компонент;
- 3) орграф-конденсация не имеет контуров (т. е. нарушений транзитивности);
- 4) орграф-конденсация – это всегда одноправленный орграф, т. е. все дуги одного направления.

В работе [5] при принятых условиях оценки индивидуальных и группового предпочтения доказано, что орграф-конденсация определяет строгий порядок, т. е. в нём нет несравнимых компонентов. В данном случае это означает, что не может быть орграфа-конденсации с нестрогим порядком предпочтения (рис. 6).

На рис. 6 отсутствует дуга  $(stz_1, stz_3)$ , т. е.  $stz_1 > stz_2, stz_2 > stz_3$ , но неизвестно отношение между  $stz_1$  и  $stz_3$ . Такой исход построения орграфа-конденсации в условиях описанной выше процедуры исключён. Строгий порядок обеспечивается формулами (1) и (2).

Именно данное свойство орграфа-конденсации с учётом порядка вычисления элементов матрицы смежности исходного орграфа и позволяет получить конструктивную и оперативную процедуру получения групповой ранжировке  $V_{\text{п.о}}$  подведомственного объекта в целом.

Групповая ранжировка  $V_{\text{п.о}}$  является ранжировкой, соответствующей орграфу-конденсации. При этом все элементы исходного орграфа группового предпочтения, входящие в его сильный компонент ( $stz_k$ ), по построению являются безразличными друг другу с уровнем группового согласия, равным 100 %. Ранжировка элементов из  $A$ , входящих в разные сильные компоненты, соответствует направлению дуг орграфа-конденсации.

Показатели, входящие в сильный компонент  $stz_1$  безразличны, т. е.  $f_1 \sim f_2 \sim f_3$ . Уровень согласия с этим упорядочением равен 100 % по определению;  $f_4 \sim f_5$ , как входящие во второй сильный компонент, с уровнем согласия 100 %. Так как  $stz_1 > stz_2, stz_1 > stz_3, stz_2 > stz_3$ , то

$$\begin{aligned} f_1 &> f_4, f_1 > f_5, f_1 > f_6; \\ f_2 &> f_4, f_2 > f_5, f_2 > f_6; \\ f_3 &> f_4, f_3 > f_5, f_3 > f_6; \\ f_4 &> f_6; \\ f_4 &> f_5. \end{aligned}$$

Групповая ранжировка  $V_{\text{п.о}}$  имеет вид:

	$V_{\text{п.о}}$
1	$f_1 \sim f_2 \sim f_3$
2	$f_4 \sim f_5$
3	$f_6$

При этом уровень согласия с ранжировкой между сильными компонентами определяется следующим образом:

с предпочтением  $stz_1 > stz_2$  (согласно не менее 62 %):

$$\varepsilon_{14} = 0,75; \varepsilon_{15} = 0,8; \varepsilon_{24} = 0,7; \varepsilon_{25} = 0,62; \varepsilon_{34} = 0,67; \varepsilon_{35} = 0,7,$$

и наименьший уровень равен  $\varepsilon_{25} = 0,62$ ;

с предпочтением  $stz_1 > stz_3$  (согласно не менее 70 %):

$$\varepsilon_{16} = 0,7; \varepsilon_{26} = 0,8; \varepsilon_{36} = 0,7;$$

с предпочтением  $stz_2 > stz_3$  (согласно не менее 62 %):

$$\varepsilon_{46} = 0,7; \varepsilon_{56} = 0,62.$$

Наихудший уровень согласия имеет место в паре  $(stz_1, stz_2)$ , равный 62 % от числа индивидуумов, участвующих в опросе. В данном случае групповая ранжировка  $V_{\text{п.о}}$ , во-первых, состоялась, во-вторых, уровень группового согласия не ниже 62 % в целом.

**Заключение.** Получаемая таким образом групповая ранжировка всегда существует и отвечает требованиям асимметрии и транзитивности предпочтений как индивидуальных, так и групповых. Она отвечает трём из четырёх аксиом Эрроу, кроме аксиомы независимости несвязанных альтернатив.

тив [6]. Независимость несвязных альтернатив – жёсткое требование, которое может не выполняться, если в индивидуальных ранжировках наряду со строгими предпочтениями присутствуют безразличия, особенно если безразличие порождается неспособностью индивидуума отдать строгое предпочтение именно в момент оценки, т. е. необязательно из-за фактической равнозначности некоторых показателей.

Кроме того, в общем случае уровень группового согласия как наименьший из уровней согласия с ранжировками в парах  $\{i, t\} - \varepsilon_{it}$  на дугах орграфа-конденсации, может быть меньше 50 % + один голос.

Последняя оценка несёт много информации для субъекта управления: если она ниже 40 %, то подведомственный объект как целое ещё не готов к организованному выражению своих взглядов, так как большая часть (не менее 60 %) элементов подведомственного объекта не видит разницы в ценности большого числа показателей множества сравнения  $A$ .

### **Библиографические ссылки**

1. Карпичев В.С. Организация и самоорганизация социальных систем. М.: Изд-во РАГС, 2007. 282 с.
2. Грибанов В.В., Лаврещ И.И., Чесноков В.П. Основные свойства самоорганизации объектов управления и подведомственных объектов искусственных систем // VIII Conferință Internațională BIT+ «TEHNOLOGII INFORMATIIONALE–2008» (25–27 apr. 2008, Chișinău). Ch.: MoldInfoNet, 2008. С. 113–116.
3. Лаврещ И.И. Самоорганизация объектов управления и меры согласования интересов субъекта и объекта управления // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 3. С. 36–41.
4. Эрроу К.Дж. Коллективный выбор и индивидуальные ценности. М.: ИД. «ГУВШЭ», 2004. 202 с.
5. Скринская Т.П. Об одном аксиоматическом методе поддержки групповых решений индивидуумов // Аспирант и соискатель. 2001. № 4. URL: <http://www.referun.com/n/metody-podderzhki-protsessov-podgotovki-i-prinyatiya-kollegialnyhresheniy-v-organah-gosudarstvennoy-vlasti-i-munitsipaln> (дата обращения: 14.02.2012).
6. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 496 с.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ**

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

**В.И. Васильев**

2013 г.      Объем 172 с.      Формат 60x88 1/16      ISBN 978-5-94275-667-3      Цена 250 р.



Рассмотрены основы построения интеллектуальных систем защиты информации в корпоративных информационных системах. Особое внимание уделено построению биометрических систем идентификации личности, систем обнаружения и предотвращения вторжений, анализа и управления информационными рисками. Изложены современные подходы к созданию данного класса систем с использованием методов теории нейронных сетей, искусственных иммунных систем, нечетких когнитивных моделей.

Допущено Учебно-методическим объединением по образованию в области информационной безопасности в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специализациям специальности "Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем".

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)



## ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

### ПРОДЭКСПО-2013

С 11 по 15 февраля 2013 г. в ЦВК «ЭКСПО-ЦЕНТР» при содействии Министерства сельского хозяйства РФ и Правительства Москвы под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ прошла юбилейная 20-я международная выставка продуктов питания, напитков и сырья для их производства.

Международная выставка «ПРОДЭКСПО» по праву считается наиболее эффективной площадкой для презентации всех видов пищевой продукции и не имеющей себе равных по качеству и количеству экспонентов и профессиональных посетителей. Ежегодно на выставку приезжает более 50 тыс. посетителей из всех регионов России и из-за рубежа, из более 1100 городов. Подавляющая часть из них – высококвалифицированные специалисты агропромышленного комплекса, 65 % – представители оптовой и розничной торговли, ресторанных и гостиничного бизнеса. Выставку «ПРОДЭКСПО» всегда посещают первые лица компаний.

Старт новому выставочному проекту на «Экспоцентре» был дан в 1994 г. Тогда в нём приняло участие 450 экспонентов из 39 стран. Доминировали иностранные торговые марки. Российские фирмы составили лишь одну шестую часть от общего числа участников.

Выставка росла вместе с рынком и в какой-то мере создавала его. Если 20 лет назад стояла задача «накормить» страну, то сегодня – предложить продукты широкого ассортимента в разных ценовых сегментах.

В настоящее время российская продовольственная индустрия – одна из лидирующих отраслей отечественного реального сектора экономики. В 2012 г. сохранилась положительная динамика производства. Индекс производства пищевых продуктов, включая напитки и табак, составил 105,1 % (против 101,0 % в 2011 г.).

Производство мяса и мясопродуктов по сравнению с 2011 г. выросло на 11,1 % (за счёт роста производства свинины парной, оставшейся, охлаждённой – на 14,8 %, мяса и субпродуктов домашней птицы – на 13,3 %, полуфабрикатов мясных охлаждённых – на 18,7 %).

Производство молочных продуктов увеличилось на 5,4 % к соответствующему периоду прошлого года (в основном за счёт роста про-

изводства сметаны – на 8,6 %, сыров твёрдых – на 6,8 % и молока жидкого обработанного – на 7,2 %).

Производство сахара белого свекловичного возросло на 3,0 %.

По сравнению с прошлым годом существенно увеличилось производство растительных и животных масел и жиров – на 21,6 % (в основном за счёт роста производства масла подсолнечного не-рафинированного – на 42,7 %).

Переработка и консервирование картофеля, фруктов и овощей характеризуется стабильным ростом – на 10,2 %.

В сегменте переработки рыбопродуктов отмечается увеличение объёмов производства рыбы слабосолёной (кроме сельди) – на 23,8 %, филе рыбного мороженого – на 7,5 %, консервов рыбных в масле – на 9,3 %.

По итогам 2012 г. наметилась тенденция увеличения объёмов экспорта российских товаров. Основная доля в экспорте продовольствия приходится на зерновые культуры (37,1 %), рыбу (12,5 %), масло подсолнечное (7,3 %). В среднесрочном периоде у России имеются возможности увеличить экспорт подсолнечного масла, сахара, мяса птицы, а также сохранить свои позиции по зерновым культурам и рыбе.

Соотношение экспонентов складывается в пользу российских фирм. Если на первой выставке было 70 экспонентов из России, то на выставке «ПРОДЭКСПО-2012» свою продукцию демонстрировало около полутора тысяч отечественных компаний со всей страны, т. е. 2/3 всех участников.

Выставка «ПРОДЭКСПО-2013» стала важным шагом в дальнейшем развитии пищевой промышленности и способствовала эффективному решению вопросов обеспечения продовольственной безопасности страны, насыщения российского рынка качественными продуктами питания.

Параллельно с «ПРОДЭКСПО-2013» прошла 4-я специализированная выставка «Упаковочные решения для пищевой промышленности» – «ПродЭкспоПак-2013», на которой 120 участников из 10 стран представили все аспекты упаковочной индустрии – от технологии и оборудования для производства упаковки до материалов и готовой продукции (тара и упаковка из стекла, картона, дерева, металла, дизайн упаковки, декорирование стекла и т. д.).



## ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

УДК 621.002.51

### По страницам журналов

**Ультразвуковая кавитационная обработка дизельного топлива как способ улучшения пусковых качеств дизеля.** Автомобильная промышленность. 2012. № 1.

Рассматривается один из наиболее перспективных способов повышения пусковых качеств дизеля – ультразвуковая кавитационная обработка дизельного топлива.

**Новая технология изготовления подшипников скольжения из композиционного материала на основе политетрафторэтилена.** Вестник машиностроения. 2012. № 1.

Рассмотрено влияние параметров ультразвукового прессования на механические и триботехнические свойства композиционного материала на основе политетрафторэтилена. Предложена новая технология изготовления подшипников скольжения, показаны её преимущества.

**Повышение износостойкости зубчатых колёс из высокопрочного чугуна термодиффузионным ванадированием.** Вестник машиностроения. 2012. № 1.

Рассмотрены вопросы технологии нанесения термодиффузионного ванадиевого покрытия на высокопрочный чугун, определено рациональное содержание ванадия в порошковой шихте, выполнены испытания чугунных зубчатых колёс с ванадиевым покрытием на износостойкость.

**Новый способ пожаротушения.** Вестник машиностроения. 2012. № 1.

Предложен новый, не имеющий аналогов способ борьбы с огнём и устройство для его реализации на основе постоянного магнитного поля.

**Конический ротационно-плёночный аппарат для выпаривания эмульсий растительных масел.** Вестник машиностроения. 2012. № 1.

Предложена новая конструкция аппарата для выпаривания фосфолипидных эмульсий растительных масел. Полное орошение внутренней поверхности корпуса обеспечивает получение эмульсии высокой концентрации за один проход масла.

**Новый метод решения сложных вариационных задач на примере исследования деформации заготовки при прошивке.** Вестник машиностроения. 2012. № 1.

Предложен новый метод аналитического решения сложных вариационных задач, эффективность которого показана на примере операции

прошивки. Систематизированы закономерности данной операции и проанализирована стадия осадки заготовки.

**Совершенствование методов оценки и повышение экологической безопасности транспортно-технологических мобильных машин.** Грузовик. 2012. № 1.

Разработаны метод количественной оценки состава отработавших газов ДВС и мобильная информационно-измерительная система для его метрологической реализации. Метод предложен в качестве расширения ГОСТ Р 52033–2003, ГОСТ Р 52160–2003 и позволяет с необходимой точностью оценить влияние выбросов мобильных машин на экологические системы с учётом санитарно-гигиенических нормативов.

**Метод моделирования зубчатых колёс на основе виртуального формирования зубьев и пятна контакта.** Грузовик. 2012. № 1.

Предложен метод моделирования зубчатых колёс путём воспроизведения станочного нарезания в системе трёхмерного моделирования, в данном случае Siemens NX (ранее EDS/Unigraphics), а также моделирование зубчатого зацепления и определение пятна контакта.

**Повышение эффективности механической обработки деталей на основе применения инструмента с модифицированными рабочими поверхностями и оптимизации процесса резания.** Наукоймкие технологии в машиностроении. 2012. № 1.

Представлены результаты работ по повышению эффективности процессов механической обработки деталей на основе применения инструмента с модифицированным воздействием низкотемпературной плазмы рабочими поверхностями и оптимизации параметров технологического режима.

**Сварка трением с перемешиванием нахлесточных соединений сплава 1460.** Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 1.

Изучены особенности структуры и свойства нахлесточных соединений алюминиево-литиевого сплава 1460, полученных сваркой трением с перемешиванием. Отмечено высокое качество швов, отсутствие дефектов и неоднородностей в зоне сварки. Разработана технология сварки нахлесточных соединений сплава 1460 трением с перемешиванием и оптимизированы режимы сварки.

**Компьютерное моделирование процесса формования заготовки сложной формы из порошка. Заготовительные производства в машиностроении.** 2012. № 1.

Рассмотрена модель пластичности уплотняющихся тел Друкера–Прагера. Осуществлена идентификация параметров модели и выполнено компьютерное моделирование процесса прессования роторного кольца из порошковой меди с помощью программного комплекса Abaqus (учебная версия). В результате определено процентное содержание смазки в порошке, обеспечивающее наиболее равномерную плотность материала заготовки, снижение давления прессования и давления выпрессовки без существенного ухудшения её прочностных свойств.

**Применение графитизирующих модификаторов нового поколения для повышения качества чугунных отливок. Заготовительные производства в машиностроении.** 2012. № 1.

Проведён анализ состояния производства и применения графитизирующих быстроохлаждённых модификаторов нового поколения. Показаны преимущества отечественных барийсодержащих кремнистых модификаторов для повышения качества чугунных отливок, в том числе для крупнотоннажных и толстостенных деталей.

**Наукоменная технология ультразвуковой очистки крупногабаритных корпусных деталей. Наукоменные технологии в машиностроении.** 2012. № 1.

Рассмотрены причины образования и виды загрязнений на крупногабаритных корпусных деталях двигателя внутреннего сгорания. Показана эффективность применения ультразвуковых технологий для очистки таких деталей, предложен способ уменьшения затрат энергии при ультразвуковой обработке.

**Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки. Наукоменные технологии в машиностроении.** 2012. № 1.

Рассмотрена структурная модель подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки как часть системы планирования многономенклатурных технологических процессов. Представлены методики формирования рациональных комплектов режущего инструмента и генерации возможных последовательностей переходов при проектировании операций фрезерной обработки.

**Метод математического моделирования нестационарных процессов в двигательном отсеке ракеты. Полёт.** 2012. № 1.

Разработаны математическая модель и алгоритм программы расчёта нестационарных процессов и определения параметров в полости двигательного отсека, образованной пространством

между двигателем и кожухом-обтекателем. Приведённые трёхмерная математическая модель и метод расчёта дают возможность исследовать поведение термодинамических параметров в кольцевых отсеках с переменной площадью проходного сечения в осевом направлении.

**Повышение сборочной технологичности конструкции изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования. Сборка в машиностроении, приборостроении.** 2012. № 1.

Рассмотрены вопросы оценки и отработки конструкции изделий на технологичность в интегрированных системах автоматизированного проектирования (САПР). Подробно рассмотрена процедура анализа сборочной технологичности конструкции с помощью методологии DFMA. Приведён пример моделирования и оценки сборочной технологичности для нескольких вариантов конструкции изделия.

**Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фрез. Сборка в машиностроении, приборостроении.** 2012. № 1.

Разработано программное обеспечение для автоматизированного расчёта конструктивных параметров и построения моделей и чертежей фасонных дисковых фрез.

**Аналитическое исследование влияния параметров обкатывания на шероховатость поверхности. Упрочняющие технологии и покрытия.** 2012. № 1.

Приведена аналитическая модель расчёта шероховатости деталей, обработанных асимметричным поверхностным пластическим деформированием, отображающая влияние на шероховатость силы, подачи, геометрии и размеров инструмента, упругопластических характеристик обрабатываемого материала.

**Определение трибологических характеристик пар трения скольжения после лазерной обработки. Трение и смазка в машинах и механизмах.** 2012. № 1.

Представлены расчётно-экспериментальные уравнения для определения трибологических характеристик пар трения скольжения, упрочнённых лазерным лучом. Показано влияние твёрдости на изменение коэффициента трения скольжения.

**Новые принципы организации антикоррозионной защиты технологического оборудования от воздействия агрессивной рабочей среды. Упрочняющие технологии и покрытия.** 2012. № 1.

Рассмотрены вопросы защиты оборудования, эксплуатируемого в опасной производственной среде, методами футеровки специальными композиционными материалами по технологиям «мокрого ламирования», листовым композитом и комбинированным способом. Показаны преимущества данного подхода перед другими методами футеровки.