

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2004

№ 2 (3)

Научно-технический
журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Июнь 2004 г.

Главный редактор	д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский
Зам. главного редактора	д.э.н., профессор В.Р. Атоян
Ответственный секретарь	д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

Редакционный совет: д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. А.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Эде Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

Редакционная коллегия: д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андриющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.ф.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. В.М. Седелкин, к.ф.-м.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор О.А. Панина
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский А.М. Руст

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 52 74 02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 50 67 40

Лицензия ИД № 06268 от 14.11.01
Подписано в печать 23.06.04
Формат 60×84 1/8 Бум. тип.
Усл. печ. л. 19,25 Уч.-изд. л. 20,5
Тираж 500 экз. Заказ 338.
Копипринтер СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

ISBN 5-7433-1400-4

© Саратовский государственный
технический университет, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Гестрин С.Г., Сальников А.Н., Самородина Т.В. Торможение заряженных дислокаций поляритонами в ионных кристаллах	5
Запис К.В., Кособудский И.Д., Ушаков Н.М., Журавлева М.Н. Наночастицы оксидов металлов в полиэтиленовой матрице.....	8
Ковырягин М.А. Регулируемые конструкции в транспортных сооружениях и машиностроении	14
Крысько В.А., Кравцова И.В. Динамика и статика секториальных оболочек	27
Макеев Н.Н. Нормализация уравнений вращения твердого тела.....	37

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Веткасов Н.И. Стойкость композиционных шлифовальных кругов.....	44
Виноградов М.В. Обеспечение точности обработки на прецизионных токарных модулях за счет применения приводов подачи с фрикционными передачами.....	51
Данилов И.К. Моделирование ремонтных циклов ДВС и оценка их трудоемкости сетевыми методами	61
Королев А.В., Королев А.А., Решетников М.К. Имитационная технология обкаткой в абразивной среде	66
Любимов И.И., Львов В.Г., Полушкин А.П., Сычев А.М. О влиянии упругих элементов в монтажных шарнирах амортизатора на колебания автомобиля.....	81
Мчедлов С.Г. Совершенствование технологии плазменных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин	85
Шумячер В.М., Бурлаченко О.В. Технологическое обеспечение управления качеством машиностроительной продукции.....	93

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Байбурин В.Б., Трачук С.А. Хаотическая динамика взаимодействующих зарядов в скрещенных полях	98
Львов А.А., Пыльский В.А. Линейная петлевая схема точной обработки сигналов датчиков	102
Сивяков Б.К., Гурьянов А.А., Сивяков Д.Б. Математическая модель мощных СВЧ полевых транзисторов для систем автоматизированного проектирования электронных устройств в многочастотных режимах	113

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Томашевский Ю.Б. Развитие концепции гибкости в электротехнических комплексах	119
-------------------------------------------------------------------------------------------	-----

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Таран В.М., Лясников В.Н., Лисовский С.М., Гусев Н.А. Гибкая система управления процессом проектирования технических объектов.....	129
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

Клочков В.Н., Гусев С.А., Логинов Н.К. Управление транспортно-логистическими системами	139
Лобачева Г.В. Лексико-семантический аспект представлений россиян о верховной власти.....	143

ЮБИЛЕИ

Владимир Николаевич Лясников (К 60-летию со дня рождения).....	155
-----------------------------------------------------------------------	------------

CONTENTS

PROBLEMS OF NATURAL SCIENCES

Gestrin S.G., Salnikov A.N., Samorodina T.V. Polariton deceleration of the charged dislocations in ion crystals	5
Zapsis K.V., Kosobudsky I.D., Yshakov N.M., Zhuravleva M.N. Nanoparticles of metals oxydes in the polyethylene matrix	8
Koviriagin M.A. The controlled constructions in supply structures and machinbuilding.....	15
Krysko V.A., Kravtsova I.V. Dynamics and statistics of sectorial shells	27
Makeyev N.N. Normalization of equations of a rotation of a solid body	37

MACHINE RELIABILITY

Vetkasov N.I. Resistance of composite crinding wheels	44
Vinogradov M.V. Maintenance of accuracy of processing on precision turning modules at the expense of application of drives of submission with frictional transfers	51
Danilov I.K. ICE (internal-combustion engine) service cycles simulation and their working hours evaluation by network methods	61
Korolev A.V., Korolev A.A., Reshetnikov M.K. Peculiarity of the simulation technology with the treatment of the abrasive medium	66
Lyoubimov I.I., Lvov W.G., Polushkin A.P., Sitchev A.M. The influence of the elasticity montage joint shock-absorber on the oscillations of the automobile	81
Mchedlov S.G. Plasma coating technology perfection at machine parts consolidation and reconstruction	86
Shumyacher V.M., Burlachenko O.V. Technological maintenance of the machine-building production quality control	94

ELECTRONICS AND INSTRUMENT MARKING

Bayburin V.B., Trachuk S.A. Chaotic dynamics associated charges in crossed fields	98
Lvov A.A., Pilsky V.A. Linear loop scheme of exact processing of transmitters signals	103
Siviyakov B.K., Gurjyanov A.A., Siviyakov D.B. Mathematical gaas power mesfet cad model for multifrequency operation	113

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Tomashevsky Yu.B. Development of the concept of flexibility in electrotechnical complexes....	119
------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

AUTOMATION AND MANAGMENT

Taran V.M., Lyasnikov V.N., Lisovsky S.M., Gusev N.A. The flexible system of management by the process of designing of technical project.....	129
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

HUMANITARIAN AND ECONOMICAL PROBLEMS OF MODERN SOCIETY

Klochkov V.N., Gusev S.A., Loginov N.K. Transport-logistic systems management.....	139
Lobacheva G.V. Lexical and semantic aspects of RussianS' NOTION of supreme power.....	143

JUBILEES

Vladimir Nikolaevich Lyasnikov	155
---------------------------------------------	-----

ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

УДК 538.911

С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Т.В. Самородина**ТОРМОЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ДИСЛОКАЦИЙ ПОЛЯРИТОНАМИ
В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Показано, что в ионном кристалле значительную роль играет поляритонный механизм торможения дислокаций. Вычислена сила торможения дислокаций, возникающая при взаимодействии ее электрического поля с поляритонами. Проведено сравнение изученного механизма с фононными.

S.G. Gestrin, A.N. Salnikov, T.V. Samorodina**POLARITON DECELERATION OF THE CHARGED DISLOCATIONS
IN ION CRYSTALS**

It is shown, that the polariton mechanism of dislocations deceleration in ion crystals plays an important role. The force of dislocation deceleration arising during interaction of its electric field with polaritons has been calculated here. The comparison of the studied mechanism with phonon ones has been done in this work.

Обширную группу явлений, сопровождающих деформирование кристаллов, составляют процессы торможения дислокаций различными видами частиц и точечных дефектов в кристаллах. В кристаллах различного рода, в зависимости от условий, доминирует тот или иной механизм торможения. При низких температурах в металлах основным является торможение дислокаций электронами проводимости, в ионных и ковалентных кристаллах значительную роль играют механизмы торможения дислокаций точечными дефектами, экситонами, поляронами [1-3]. При высоких температурах, как правило, доминируют фононные механизмы торможения дислокаций [6].

Как будет показано в настоящей работе, при движении дислокаций в ионном кристалле наряду с изученными ранее механизмами становится существенным торможение дислокаций поляритонами.

Поляритоны образуются в результате взаимодействия в кристаллах фотонов и фононов, соответствующих оптическим колебаниям. Возникновение поляритонов существенно влияет на диэлектрические свойства ионных кристаллов [4]. Ниже вычислена сила торможения, действующая на движущуюся дислокацию, возникающая при взаимодействии ее элек-

трического поля с поляритонами, затухание которых в кристалле определяется через мнимую часть диэлектрической проницаемости [4].

Рассмотрим отдельную дислокацию в кристалле. Систему координат выберем таким образом, чтобы ось Z была направлена вдоль линии дислокации, на которой распределен заряд с линейной плотностью σ_D . Дислокация движется таким образом, что ее скорость перпендикулярна оси Z .

Потенциал электрического поля, созданного дислокацией, описывается уравнением Пуассона:

$$\varepsilon \Delta \varphi = -4\pi \sigma_D \delta(\mathbf{r} - \mathbf{V}t), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость кристалла; \mathbf{V} – скорость дислокации; $\mathbf{r}=(x,y)$ – двумерный радиус-вектор.

Разлагая потенциал и дельта-функцию в интегралы Фурье по координатам и по времени, для фурье-компонент потенциала и напряженности получим следующие выражения:

$$\varphi_{k\omega} = \frac{8\pi^2 \sigma_D}{\varepsilon k^2} \delta(\omega - kV). \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_{k\omega} = -i\mathbf{k} \varphi_{k\omega} = -i \frac{8\pi^2 \sigma_D}{\varepsilon k^2} \mathbf{k} \delta(\omega - kV). \quad (3)$$

Мощность, диссипируемая единицей длины движущейся дислокации:

$$\frac{dW}{dt} = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{j} \mathbf{E} dx dy. \quad (4)$$

Плотность тока, создаваемого движущейся дислокацией, может быть записана в виде:

$$\mathbf{j} = \sigma_D \mathbf{V} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{V}t). \quad (5)$$

Разлагая выражение для \mathbf{j} в интеграл Фурье по координатам и времени, для мощности потерь получим соотношение:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{i\sigma_D^2}{\pi} \iint d\mathbf{k} d\omega \frac{\mathbf{k} \mathbf{V}}{\varepsilon k^2} \delta(\omega - kV). \quad (6)$$

Диэлектрическая проницаемость кристалла, обусловленная поляритонами [4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Omega_t^2 (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})}{\Omega_t^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}. \quad (7)$$

Здесь ω – частота электромагнитной волны; ε_0 и ε_{∞} соответственно низкочастотная и высокочастотная диэлектрические проницаемости кристалла; Ω_t – частота длинноволновых поперечных оптических колебаний в кристалле; Γ – параметр, определяющий затухание поляритонов.

Для преобразования отношения $\frac{1}{\varepsilon(\omega)}$, входящего в выражение для мощности, введем в рассмотрение частоту продольных оптических колебаний Ω_e , связанную с частотой поперечных оптических колебаний соотношением Лиддейна-Сакса-Теллера. Мощность потерь определяется мнимой частью входящей в (6) величины $\frac{1}{\varepsilon(\omega)}$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{1}{\varepsilon(\omega)}\right) = \frac{\omega \Gamma \Omega_e^2 (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{\varepsilon_\infty^2 (\Omega_t^2 - \omega^2)^2}. \quad (8)$$

Таким образом, для мощности, диссипируемой единицей длины дислокации, имеем

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\sigma_D^2 \Gamma \Omega_t^2 (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{\pi \varepsilon_\infty^2} \iint dk d\omega \frac{k V \omega}{k^2 (\Omega_t^2 - \omega^2)^2} \delta(\omega - kV). \quad (9)$$

Интегрирование формулы (9) по частоте, проведенное при помощи дельта-функции и по волновому вектору в пределах от 0 до $k_{\max} \sim 1/a$, где a – постоянная кристаллической решетки, приводит к результату:

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\sigma_D^2 \Gamma (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{2 a^2 \varepsilon_0^2 \Omega_t^2} V^2 \left[1 + \frac{3}{2} \frac{V^2}{a^2 \Omega_t^2} \right]. \quad (10)$$

Разделив это выражение на скорость движения дислокации V , получим силу торможения, действующую на единицу длины дислокации:

$$F = -\frac{\sigma_D^2 \Gamma (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{2 a^2 \varepsilon_0^2 \Omega_t^2} V \left[1 + \frac{3}{2} \frac{V^2}{a^2 \Omega_t^2} \right]. \quad (11)$$

Таким образом, сила торможения дислокации возрастает с увеличением скорости дислокации в основном по линейному закону (второе слагаемое в квадратных скобках (11) представляет собой малую поправку).

Произведем оценку величин, характеризующих изученный механизм торможения дислокаций. Диссипацию энергии при движении дислокации удобно характеризовать коэффициентом динамического торможения, который представляет собой коэффициент пропорциональности между скоростью дислокации и силой торможения [6]: $B = F/V$. Если пренебречь в выражении (11) вторым слагаемым по сравнению с единицей, для коэффициента торможения получим:

$$B = \frac{\sigma_D^2 \Gamma (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{2 a^2 \varepsilon_0^2 \Omega_t^2}. \quad (12)$$

Плотность заряда на дислокации σ_D в ионных кристаллах достигает величины $2 \cdot 10^{-2}$ ед.СГСЭ/см, частота поперечных оптических колебаний $\Omega_t = 3,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$, коэффициент затухания $\Gamma \cong 10^{12} \text{ с}^{-1}$ (по данным [4] для NaCl). Постоянная кристаллической решетки $a \sim 10^{-8}$ см, $\varepsilon_0 = 5,2$, $\varepsilon_\infty = 3,8$ [5]. Таким образом, расчеты дают значение $B \cong 10^{-3}$ Пуаз.

Полученное нами значение коэффициента торможения является типичным для фоновых механизмов, считающихся основными механизмами торможения дислокаций (например, фоновый ветер, релаксация медленных фононов [6]). Изученный нами процесс взаимодействия дислокаций с поляритонами, таким образом, входит в число основных механизмов торможения дислокаций в ионных кристаллах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гестрин С.Г., Сальников А.Н., Самородина Т.В. Поглощение дислокационных фононов поляронами сильной и слабой связи в щелочно-галогидных кристаллах при низких температурах // Известия вузов. Физика. 1999. № 9. С.18-22.
2. Гестрин С.Г., Сальников А.Н., Самородина Т.В. Поглощение дислокационных фононов экситонами и примесными атомами при низких температурах // Известия вузов. Физика. 1999. № 11. С.7-11.

3. Гестрин С.Г., Сальников А.Н., Струлева Е.В. Взаимодействие движущихся заряженных дислокаций с облаками точечных дефектов в ионных кристаллах во внешнем магнитном поле // Кристаллография. 1997. Т.42. № 1. С.1-4.

4. Давыдов А.С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.

5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.

6. Альшиц В.И., Инденбом В.Л. Динамическое торможение дислокаций // УФН. 1975. Т.115. Вып.1. С.3-39.

Гестрин Сергей Геннадьевич –

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная физика» Саратовского государственного технического университета

Сальников Александр Николаевич –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная физика» Саратовского государственного технического университета

Самородина Татьяна Валерьевна –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная физика» Саратовского государственного технического университета

УДК 541.123:546.21`831`832

К.В. Запис, И.Д. Кособудский, Н.М. Ушаков, М.Н. Журавлева

**НАНОЧАСТИЦЫ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ
В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ МАТРИЦЕ**

Методом термического распада солей карбоновых кислот получены медь- и цинксодержащие наночастицы в матрице полиэтилена высокого давления. Проведено исследование фазового состава с помощью метода рентгеновского фазового анализа. Показано, что состав наночастиц зависит от их концентрации в матрице. Размер частиц, определенный с помощью микроскопии высокого разрешения, составил 6,5-11 нм и 4-7 нм для медь- и цинксодержащих наночастиц соответственно.

K.V. Zapsis, I.D. Kosobudsky, N.M. Yshakov, M.N. Zhuravleva

**NANOPARTICLES OF METALS OXYDES
IN THE POLYETHYLENE MATRIX**

By method of thermal disintegration of salts of carbon acids nanoparticles of copper and zinc are received in a matrix of low density polyethylene. A research of phase structure with the help of a method of the x-ray phase analysis is done. It is here, that the structure of nanoparticles depends on their concentration in a matrix. The size of particles determined with the help of microscopy is 6,5-11 nanometers and 4-7 nanometers for copper and zinc containing nanoparticles accordingly.

Введение

В настоящее время внимание исследователей продолжают привлекать ультрадисперсные среды (УДС). В частности, в области разработки материалов огромный интерес представляют композиционные материалы с наноструктурной морфологией отдельных элементов. Благодаря уникальным свойствам УДС на основе металлополимеров находят широкое применение в радио- и оптоэлектронике в качестве магнитных [1-4], электропроводящих [5] и оптических сред [6]. Причем, в зависимости от концентрации заполнения диэлектрической матрицы наночастицами металла, в частности железа, в электрофизических и оптических свойствах металлополимерных нанокомпозитов могут наблюдаться изменения в широких пределах с проявлением квантово-размерных эффектов [7]. Данная работа направлена на получение новых композиционных материалов на основе органических полимеров, содержащих наноразмерные частицы переходных металлов, а также исследование их строения и состава.

Методика эксперимента

Образцы композиционного материала получали по известной методике [1-3], в основе которой лежит метод высокоскоростного термического распада нестойких карбоновых кислот. В качестве исходных соединений использовались одноводный диацетат меди $((\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}\cdot\text{H}_2\text{O})$ и семиводный диацетат цинка $((\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 7\text{H}_2\text{O})$, разложение которых осуществляли при $t=250^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ в среде полимера. Получены образцы композиционных материалов на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД), с содержанием меди – 10, 20 масс.% и цинка – 10, 20 масс.%.

Для исследования фазового состава полученных материалов использовался метод рентгеновского фазового состава. Образцы исследовали на дифрактометре «ДРОН-4» (CoK α). Монохроматор – графит, скорость сканирования 2 град/мин. Длина волны кобальтового излучения $\lambda=1,789 \text{ \AA}$. Съемка производилась на углах 2θ от 30 до 120 град. На дифрактограммах выбирались пики, значение $I_{\text{сигнал}}/I_{\text{шум}}$ которых выше 2. Положение максимумов определялось с точностью до 0,01 град. Идентификацию фаз производили по величине d_{hkl} , которую рассчитывали по уравнению Брэгга-Вульфа [7,8]. Размер частиц определяли по интегральной ширине дифракционных пиков в соответствии с формулой Дебая-Шерера [8].

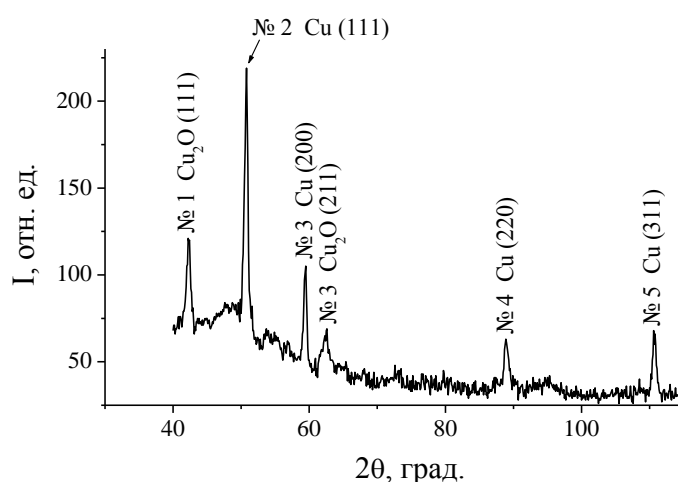
Размер и распределение частиц по размерам также исследовали методом микроскопии высокого разрешения, с помощью просвечивающего микроскопа «JEM-100B» фирмы «JEOL».

Результаты и их обсуждение

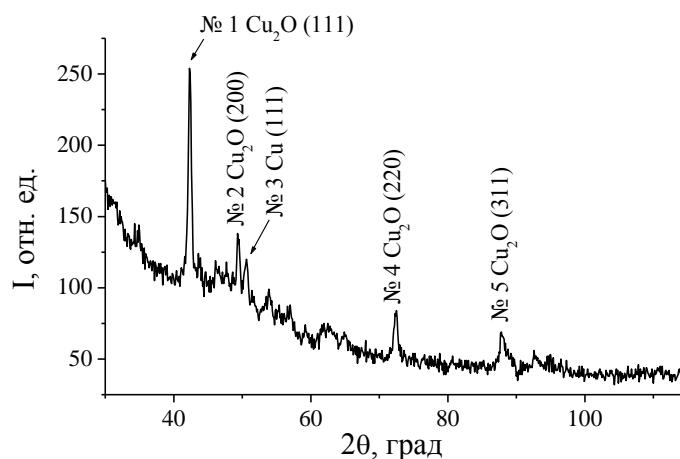
В работах [1-3] по исследованию строения и состава наночастиц железа в матрице полиэтилена, полученных по аналогичной методике, показал, что в среде полимера образуются частицы с размерами от 1,8 до 10 нм. Распределение частиц по размерам бимодально: основная группа частиц имеет средний размер 1-3 нм, а также присутствует небольшая группа частиц со средним размером 8 нм. Форма частиц сферическая или сфероидальная. Там же [3] показано, что наночастицы имеют сложный состав, зависящий от их концентрации в матрице полимера. При малых концентрациях (1...10 масс.%) фаза α -Fe дополняется фазой оксида, а при больших (20...50 масс.%) концентрациях – карбидной фазой.

Результаты, полученные методом рентгенофазового анализа для синтезированных образцов, свидетельствуют о следующем. На рис. 1 приведены рентгеновские спектры образцов ПЭВД+Cu с содержанием металла в 10 и 20 масс.%. Спектр образца ПЭВД+Cu (см. рис. 1,а) характеризуется наличием всех характерных для меди пиков с соответствующими значениями $d_{hkl}=2,085; 1,803; 1,277; 1,087$. Также наблюдаются мало интенсивные пики при

углах $2\theta=42,21$ и $64,35$, значения $d_{hkl}=2,484$ и $d_{hkl}=1,735$ которых можно отнести к Cu_2O . Это объясняется тем, что поверхность металлической частицы покрыта незначительным слоем оксида. При дальнейшем введении металла до 20 масс.% слой оксида увеличивается, что приводит к появлению в спектре образца ПЭВД+Cu 20 масс.% дополнительных пиков (см. рис. 1,б), характерных для Cu_2O , в областях $2\theta=49,65$; $72,66$; $88,22$, при этом их интенсивность увеличивается, а пики, соответствующие металлической меди, исчезают, за исключением пика с малой интенсивностью при $2\theta=50,80$. Такая структура – металлическое ядро, сосредоточенное внутри частицы, окруженное оксидной оболочкой, – «reach-структура» является характерной для большинства композиционных материалов, содержащих наночастицы [9,10].



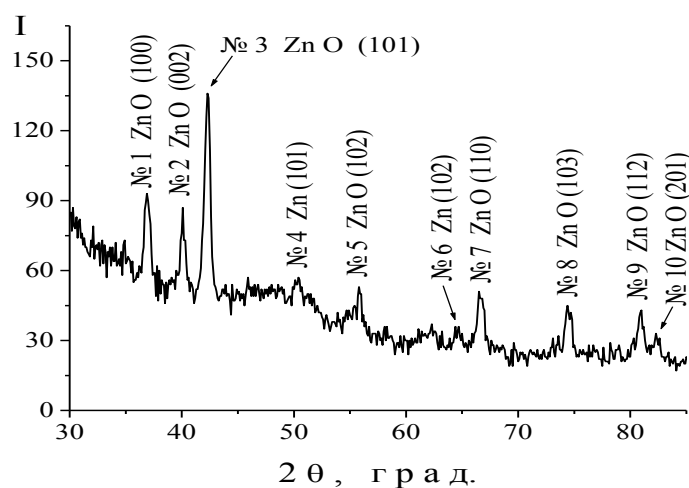
а



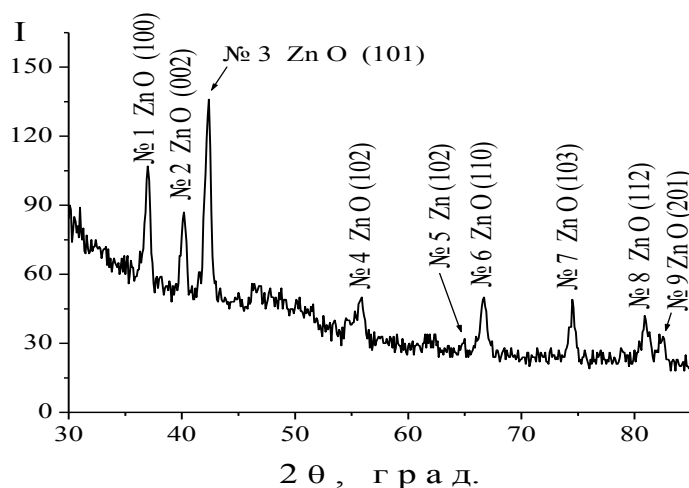
б

Рис. 1. Рентгеновские спектры образцов ПЭВД+Cu: а – 10 масс.% ; б – 20 масс.%

Для образцов материалов, содержащих цинк, рентгеновские спектры приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, спектры обоих образцов ПЭВД+Zn с концентрацией цинка в 10 и 20 масс.% характеризуются наличием множества уширенных пиков с величиной $d_{hkl}=2,824$; $2,610$; $2,478$; $1,910$; $1,631$; $1,480$; $1,377$, которые относятся к оксиду цинка. Однако, также присутствует пик при $2\theta=50,40$, относящийся к металлическому цинку.



а



б

Рис. 2. Рентгеновские спектры образцов ПЭВД+ZnO: а – 10 масс.% ; б – 20 масс.%

С помощью рентгенофазового анализа можно оценить размер структурных элементов (частиц, кристаллитов, блоков когерентного рассеяния и др.). Это представляется возможным при малых размерах (но не менее 100 нм) последних, поскольку, уменьшение размера менее 100 нм приводит к увеличению полуширины пиков. Используя формулу Дебая-Шеррера [12],

$$D = 0,94 \lambda / B \cos \theta , \quad (1)$$

где B – полуширина пика в радианах вычисляется по формуле Уоррена [12]

$$B^2 = B_{\text{образца}}^2 - B_{\text{эт.}}^2 , \quad (2)$$

где $B_{\text{эт.}}$ – полуширина пика контрольного образца (в данном случае порошка Cu, Cu₂O и ZnO в чистом виде без ПЭВД) с размером частиц не менее 100 нм, удалось определить размер частиц. Для образцов ПЭВД+Cu 10, 20 масс.% и ПЭВД+ZnO размер частиц составил $D_{\text{ПЭВД+10\%Cu}}=7\pm 1\div 2$ нм, $D_{\text{ПЭВД+20\%Cu}}=12\pm 1\div 2$ нм и $D_{\text{ПЭВД+10\%ZnO}}=5\pm 1\div 2$ нм, $D_{\text{ПЭВД+20\%ZnO}}=6\pm 1\div 2$ нм соответственно.

Более точное определение размера частиц, а также исследование их строения осуществлялось при помощи микроскопии высокого разрешения (ТЕМ). На рис. 3, 4 приведены микрофотографии образцов ПЭВД + Cu, ZnO и с концентрацией частиц 10 и 20 масс.% (рис. 3, а,б и рис. 3, в,г соответственно). Как видно из рис. 3, на фоне светлой части – полимерной матрицы присутствуют черные образования – металлсодержащие наночастицы, по форме сферические или близкие к сферическим. Распределение частиц по размерам для обоих образцов является достаточно узким (рис. 4). Средний размер частиц составляет $D_{\text{ПЭВД}+10\%\text{Cu}}=6,5$ нм, $D_{\text{ПЭВД}+20\%\text{Cu}}=11$ нм и $D_{\text{ПЭВД}+10\%\text{ZnO}}=6$ нм, $D_{\text{ПЭВД}+20\%\text{ZnO}}=6$ нм соответственно, что хорошо согласуется с данными, полученными при помощи рентгенофазового анализа.

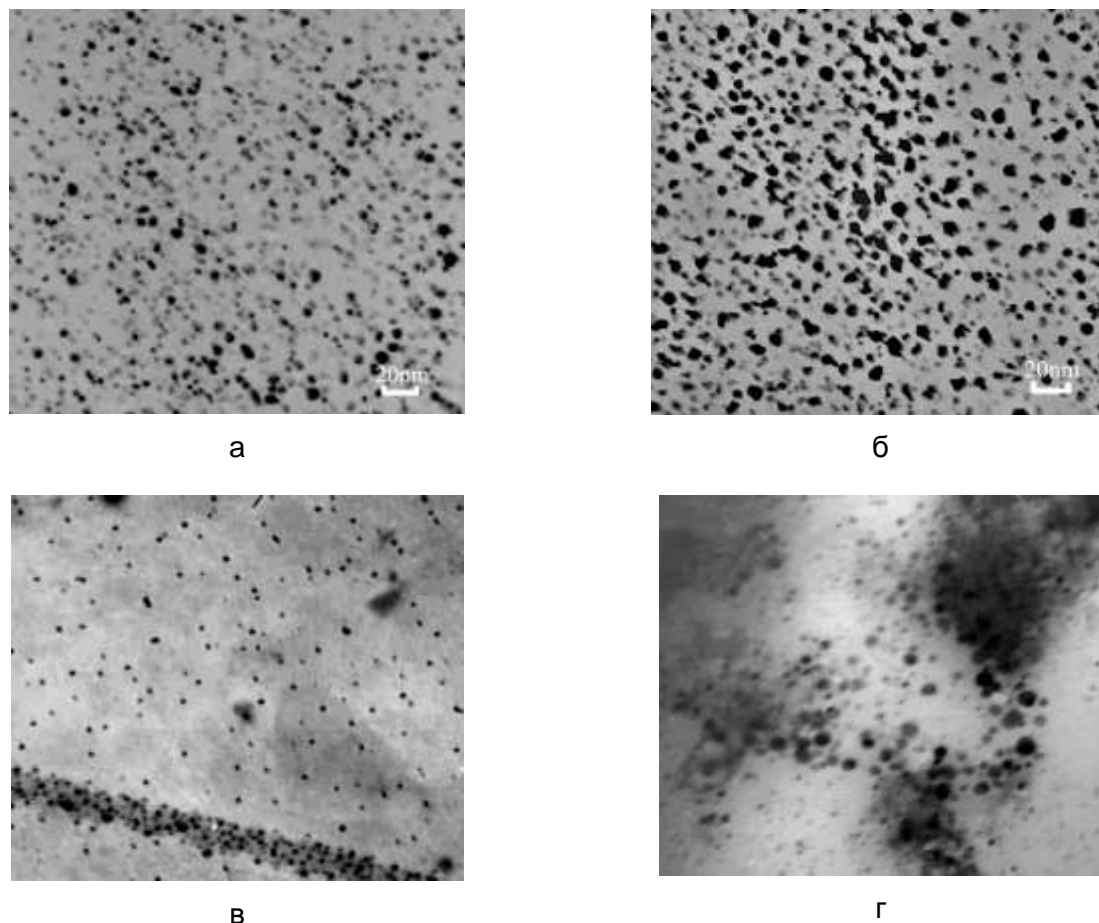


Рис. 3. Микрофотографии (ТЕМ) образцов ПЭВД+Cu, ZnO:
а – ПЭВД+Cu 10 масс.% ; б – ПЭВД+Cu 20 масс.%;
в – ПЭВД+ZnO 10 масс.%; г – ПЭВД+20 масс.%

Выводы

Таким образом, установлено, что в матрице полиэтилена методом термического разложения ацетатов меди и цинка можно получить изолированные друг от друга сферические наночастицы с размерами от 5 до 15 нм, имеющие сложный состав. Для материалов ПЭВД+Cu при концентрации металла 10 масс.% основной фазой является металлическая медь, с небольшим поверхностным слоем оксида меди (I), который значительно увеличивается с увеличением концентрации металла до 20 масс.%. Для материалов ПЭВД+ZnO основной фазой, при концентрациях металла 10 и 20 масс.% является оксид цинка.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ грант № 04-03-32597-а).

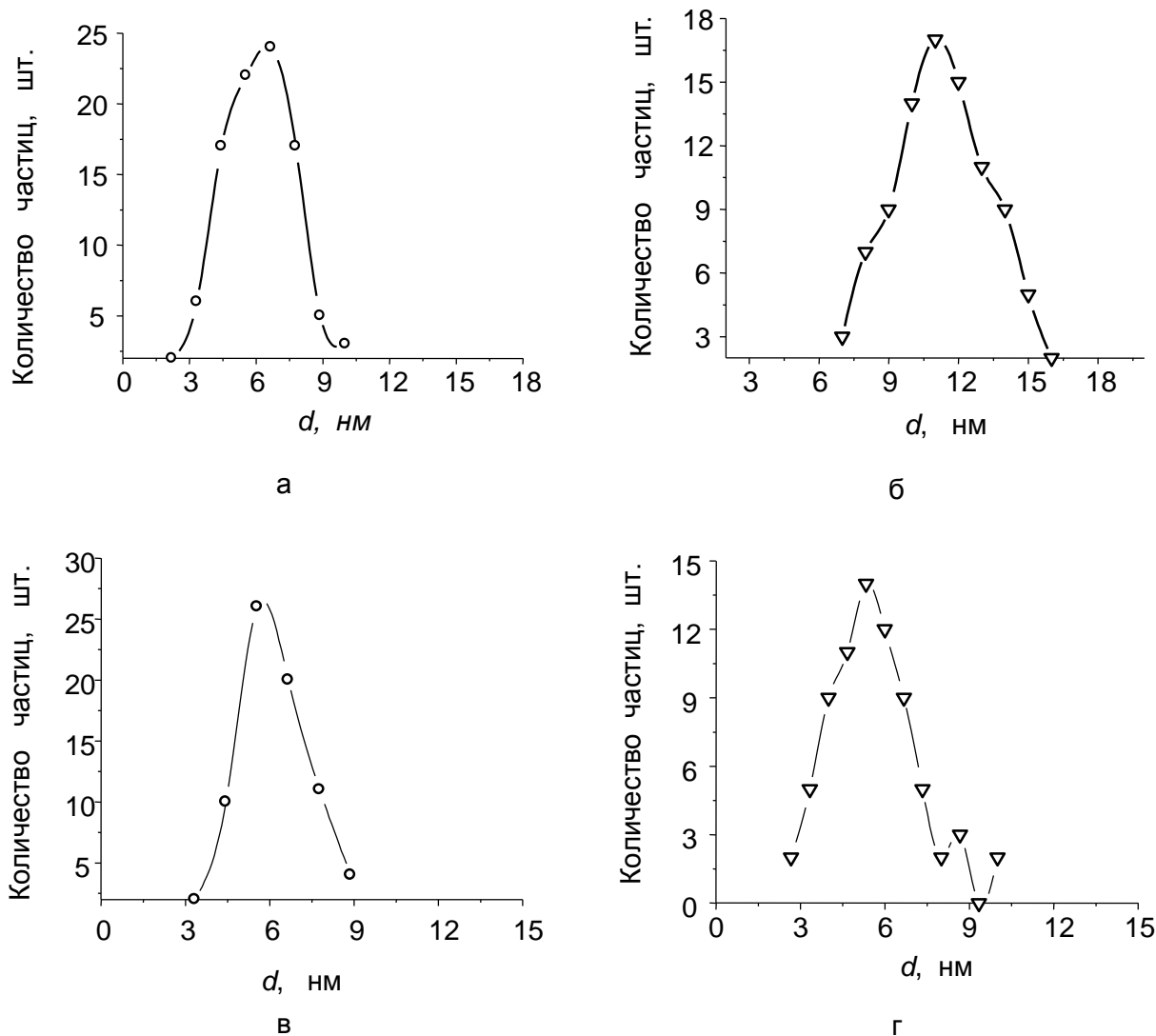


Рис. 4. Кривые распределения частиц по размерам для образцов ПЭВД+Cu, ZnO:
а – ПЭВД+Cu 10 масс.%; б – ПЭВД+Cu 20 масс.%;
в – ПЭВД+ZnO 10 масс.%; г – ПЭВД+20 масс.%

ЛИТЕРАТУРА

1. «Безлигандные» металлические кластеры в инертных полимерных матрицах / С.П. Губин, И.Д. Кособудский, С.П. Пискорский и др. // ДАН СССР. 1981. Т.260. № 3. С.655-658.
2. Губин С.П., Кособудский И.Д. Однофазные металлополимеры // ДАН СССР. 1983. Т.273. № 3. С.1155-1158.
3. Новые металлополимеры – металлические кластеры в полимерной матрице / С.П. Губин, И.Д. Кособудский, С.П. Пискорский и др. // Высокомолекулярные соединения. 1985. № 4. С.689-695.
4. Кластеры в полимерной матрице. 1. Исследование состава и строения железосодержащих кластеров во фторопластовой матрице / А.В. Козинкин, О.В. Север, С.П. Губин и др. // Известия РАН. Неорганические материалы. 1994. Т.30. № 5. С.678-684.

5. Ушаков Н.М., Запис К.В., Кособудский И.Д. Электрофизические и диэлектрические свойства железосодержащих наноконкомпозитов // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29. № 22. С.29-32.

6. Оптические свойства металлополимерных наноконкомпозитов / Н.М. Ушаков, В.И. Кочубей, К.В. Запис, И.Д. Кособудский // Оптика и спектроскопия. 2004. Т.96. № 5. С.874-879.

7. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лаповок В.Н. Физические явления в ультрадисперсных средах: М.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с.

8. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ: М.: Изд-во МГУ, 1976. 160 с.

9. Кособудский И.Д., Севостьянов В.П., Юрков Г.Ю. Исследование фазового состава композитов на основе наночастиц железа в смешанной матрице N-парафина и полиэтилена высокого давления // Известия вузов. Химия и хим. технология. 2000. Т.43. № 1. С.21-29.

10. Наночастицы меди в полиэтиленовой матрице / Г.Ю. Юрков, А.В. Козинкин, Т.И. Недосейкина и др. // Известия РАН. Неорганические материалы. 2001. № 11. С.54-62.

Запис Константин Васильевич –

аспирант кафедры «Химия»

Саратовского государственного технического университета

Кособудский Игорь Донатович –

доктор химических наук, профессор кафедры «Химия»

Саратовского государственного технического университета

Ушаков Николай Михайлович –

доктор физико-математических наук,

заведующий лабораторией Саратовского отделения ИРЭ РАН

Журавлева Мария Николаевна –

аспирант кафедры «Химия»

Саратовского государственного технического университета

УДК 539.3:624.042

М.А. Ковырягин

**РЕГУЛИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ
В ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ И МАШИНОСТРОЕНИИ**

Рассматриваются вопросы управления напряженно-деформированным состоянием мостовых конструкций. Анализируется отечественный и зарубежный опыт. Обсуждаются технологии пассивного управления, такие как изоляция основания и рассеяние энергии. Акцент делается на активных, гибридных и полупассивных управляющих системах. Описаны обычные схемы и механизмы, используемые в управляемых системах. Далее представлены общие методы управления. Обсуждаются практические предложения по методам активного управления в мостах и машиностроительных конструкциях.

M.A. Koviriagin**THE CONTROLLED CONSTRUCTIONS
IN SUPPLY STRUCTURES AND MACHINBILDING**

In this article the control of stress-deformed constructions in bridge engineering are considered. The russian and foreing experience is analyzed. Passive control is considered, including installing isolators of seismic ground motions or adding passive energy dissipation devices to dissipate vibration energy. Active, hybrid and semi-active controls are described here. Ordinary schemes and mechanisms of control systems are described in this work. General methods of control are represented. Practical methods of control in bridges and machinbiling structures are considered as well.

1. Регулируемые мостовые конструкции

Изменение напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций в процессе изготовления отдельных деталей, сборки, в эксплуатации интересовало связанных с этими процессами инженеров с тех пор как существует документация на мосты. Талант, опыт и настойчивость инженеров, менеджеров и рабочих, востребованные необходимостью строительства мостов, приводят к тому, что мостостроение впитывает все новейшие достижения в области проектирования, технологии изготовления и сборки из машиностроения, промышленного и гражданского строительства, а также кибернетики, физики, гидродинамики и множества других наук, производя на свет в конечном счете произведения мостостроительного искусства, служащие людям многие десятилетия.

При оптимизации конструкции в процессе проектирования традиционно в качестве варьируемых параметров выбираются геометрические параметры элементов конструкций: форма и размеры сечений стержневых элементов, пластин и тому подобное. Однако очень интересные возможности открываются с развитием нового типа сооружений – управляемых конструкций [1]. Такие конструкции, по определению, активно реагируют на изменяющиеся окружающие условия и подстраивают свои параметры, например, жесткости или длины отдельных элементов, чтобы отвечать этим условиям наилучшим образом. Разумеется, такие возможности специально закладываются в конструкцию на стадии проектирования.

Известные проекты управляемых конструкций, разработанные Н.П. Абовским с последователями [2,3], являются конструкциями – механизмами, оборудованными датчиками, исполнительными устройствами и системой автоматического управления, функционирующей без вмешательства человека. Однако самими разработчиками признается, что проекты такого рода весьма дорогостоящи и оправданы только для немногочисленных уникальных сооружений.

Современный уровень проектирования конструкций и технологии изготовления материалов позволяет производить управление и в случае обычных конструкций [4,5]. Как правило, ответственные конструкции в течение срока службы подвергаются серии ремонтов, цель которых – не допустить превышения параметрами конструкции предельно допустимых значений. Дрейф параметров конструкций во времени при статическом нагружении происходит по причине естественной деградации материала, а также из-за агрессивных и иных внешних воздействий. До настоящего времени о необходимости очередного ремонта судят по результатам натурного обследования конструкции. Однако технология учета вышеупомянутых агрессивных и иных воздействий развита настолько, что позволяет спрогнозировать время и объемы плановых ремонтов, то есть, произвести оптимизацию по этим параметрам.

Такое действие следует считать оптимальным управлением конструкцией и об эффективности его говорят недавние исследования североамериканских специалистов [6]. Что касается возможности управления свойствами конструкций без превращения их в механизмы, можно упомянуть о разработке специальных добавок для бетона, которые могут быть термически активированы в произвольный момент срока службы бетонной конструкции и восстановить исходные прочность и сплошность бетона.

Другим направлением совершенствования мостовых конструкций является регулирование напряженно-деформированного состояния в них при действии динамических сил от перемещающегося транспорта, порывов ветра, шторма, землетрясения с тем, чтобы гарантировать эксплуатационную надежность моста при всех возможных неблагоприятных наложениях таких нагрузок.

Простейшим противодействием динамическим силам является установка подушек для изолирования конструкции от сейсмического движения основания или установки устройств, рассеивающих энергию вибраций или динамических воздействий. Успешное использование этих новых направлений проектирования в мостовых конструкциях является многообещающим [6]. В сравнении с пассивным рассеянием энергии, технология активного управления является самой новой. С тех пор как активная управляющая система приобретает лучшую приспособляемость к требованиям практики и больший авторитет, чем пассивная система, возможность использования активных управляющих систем в мостостроении привлекает все большее внимание.

2. Классификация управляющих систем

Структурно управляющие системы классифицируются по следующим четырем категориям [7]:

- **Пассивное управление** – управляющая система не требует внешнего энергетического источника. Механизмы пассивного управления прикладывают усилия в ответ на перемещение конструкции. Энергия в системе, управляемой по пассивной схеме, не может быть увеличена механизмами пассивного управления.

- **Активное управление** – система управления нуждается во внешнем источнике энергии для управляющих активаторов, которые прикладывают к конструкции силы различными способами. Эти управляющие силы могут использоваться двояко как для концентрации, так и для рассеяния энергии в конструкции. В системах управления с активной обратной связью сигналы на исполнительные механизмы передаются как функция ответа системы, измеренная физическими датчиками (оптическими, механическими, электрическими, химическими и другими).

- **Гибридное управление** – система управления использует комбинацию активной и пассивной систем регулирования. Например, конструкция, снабженная вязкоэластичным демпфированием дополнительно к регулируемому инерционному демпферу на самой высокой точке конструкции или изолирующей подушке с исполнительным механизмом, активно управляемым по коэффициенту усиления.

- **Полуактивное управление** – система управления, для функционирования которой энергии извне требуется на порядок меньше, чем для обычной активной системы. Естественным является тот факт, что механизмы полуактивного контроля не увеличивают механическую энергию устройств системы (включая системные и управляющие механизмы), за счет чего гарантирована стабильность входных и выходных параметров. Устройства полуактивного управления зачастую имеют вид механизмов пассивного регулирования.

В качестве примера можно привести систему активного управления пролетом моста с активным инерционным демпфером, установленным на каждой опоре, и подушками, сейсмически изолирующими ферму от опор. Естественно, что изолирующие подушки защища-

ют мост от землетрясения за счет гашения вибраций. Эти системы имеют преимущество в простоте, надежности и не требуют внешних источников энергии для собственного функционирования. Изолирующие системы, однако, трудно разместить и они стесняют конструкцию в местах соединения (на стыках). К недостаткам механизмов пассивного контроля и управления, с другой стороны, относится тот факт, что они пассивно откликаются на структурные изменения по однажды введенной схеме [6].

Разрабатываемые активные системы имеют уникальные возможности. Базируясь на реакциях конструкции и внешних возмущениях, эти интеллектуальные системы могут активно изменять их свойства и управляющие силы, максимизируя эффективность защиты системы, увеличивая срок службы моста, позволяя выдерживать экстремальную нагрузку [6]. К недостаткам относится тот факт, что приложение больших компенсирующих нагрузок требует в активно регулируемых системах значительного энергопотребления, что затрудняет реализацию. Кроме того, чисто активно управляемые системы могут быть недостаточно надежны. Естественно, поэтому комбинируются активные управляемые системы с опорными развязывающими подушками, которые дают результат так называемого гибридного управления. Гибридная управляющая система более реализуема, чем чисто активная система, так как пассивные элементы могут защитить мосты от обычного повреждения, если активная часть не сможет выдержать экстремальную нагрузку. Но установка и эксплуатация двух различных систем является главным недостатком гибридной схемы. Окончательно полуактивный способ регулирования несущей способности моста определяется в соответствии с возможностью активной регулировки давления или коэффициента трения в опорах скольжения моста. Мощность, необходимая для получения управляемого сигнала и механических воздействий в полуактивных управляющих системах небольшая. Незначительная по размерам батарея может иметь достаточно емкости для запаса необходимой энергии для компенсации возмущения. Таким образом, в будущем эти системы управления останутся эффективными, несмотря на неизбежное потребление энергии. Именно поэтому системы полуактивного контроля сейчас имеют реально приемлемый вид.

Различные управляемые системы с их достоинствами и недостатками представлены в таблице [7].

Взаимосвязь различных этапов развития управляющих технологий изображена на рис. 1 [9]. В левом столбце перечислены все известные в настоящее время механизмы, используемые в системах активного управления мостовыми конструкциями. В среднем столбце указаны типовые алгоритмы преобразования сигналов от датчиков перемещений, скоростей и ускорений на исполнительные механизмы, упомянутые ранее. Правый столбец содержит номенклатуру получаемых от суперпозиции первых двух столбцов типов управления и получаемых при этом эффектов. Базирующаяся на измеряемой деформации активная управляемая система может быть представлена в виде трех различных схем. Схема с обратной связью после произведенных измерений использует информацию для коррекции с использованием управляющих усилий. Другая схема, называемая системой управления с прямой связью, производит коррекцию непосредственно при измерении и используется преимущественно при больших ускорениях. Естественным является комбинирование упоминаемых терминов – прямая/обратная связь, если при выработке стратегии управления используется информация как о возмущениях, так и о свойствах системы [9].

Мост, снабженный такой активной системой управления, может изменять свои характеристики при различных внешних воздействиях и противостоять им. Такая самоадаптация создает эффективную защиту по отношению к экстремальной нагрузке и относительно нечувствительна к статическим нагрузкам и подвижкам основания. Кроме того, активная управляющая система может быть использована при смягчении сверхрискованных ситуаций, например, управлении вибрациями при землетрясениях.

Мостовые управляемые системы

Системы	Типовые механизмы	Преимущества	Недостатки
Пассивные	Подушки из эластомерической резины (РОЧ)	Простота	Большие перемещения
	Резино-свинцовые подушки	Дешевизна	Неизменяемые свойства
	Инерционные демпферы	Простота установки	
	Демпферы сухого трения	Простота обслуживания	
	Демпферы внутреннего трения	Не нужна внешняя энергия	
	Демпфер с переменной инерционной характеристикой	Стабильность конструкции	
	Регулируемые жидкостные демпферы		
Активные	Управляемая связь	Сильная система	Нуждается во внешней энергии
	Управляемая опорная подушка		Система может дестабилизироваться
	Управляемый инерционный демпфер		Усложненная система
Гибридная	Управляемый инерционный демпфер + подушка	Сильная и реализуемая	Два положения системы
	Управляемая растяжка + подушка		
	Управляемый инерционный демпфер + демпфер внутреннего трения		
Полуактивная	Управляемые опоры скольжения	Стабильность конструкции	Два положения системы
	Управляемые демпферы сухого трения	Требуют мало энергии	
	Управляемые жидкостные демпферы	Простота установки	

3. Типы управления

Предполагается, что эффект управления достижим в идеальной ситуации: мост представляется как линейная структура с линейным регулятором. В действительности и реальная конструкция и система регулирования являются существенно нелинейными. Однако, если интервал действия управляющей системы является малым и вовлекаемые нелинейности являются сглаженными, то управляющая система в динамике может быть описана системой линеаризованных дифференциальных уравнений. В общем, нелинейности могут быть классифицированы как врожденные (естественные) и внешние (искусственные). Естественными нелинейностями являются такие, которые естественно сообразуются с конструкцией моста. Примерами естественных нелинейностей являются: нелинейная деформация компонентов моста, сейсмические изоляторы, демпферы трения и т.д. Внешними нелинейностями, с другой стороны, являются законы регулирования, искусственно введенные в мостовые схемы управления самим проектировщиком. Нелинейные законы управления, такие как оптимальное импульсное управление, скользящее модальное управление и адаптивный контроль, являются типичными примерами внешних нелинейностей.



Рис. 1. Технологии управления

В соответствии с видом моста и управления, общие типы управления могут быть классифицированы на следующие четыре категории, изображенные на рис.2.

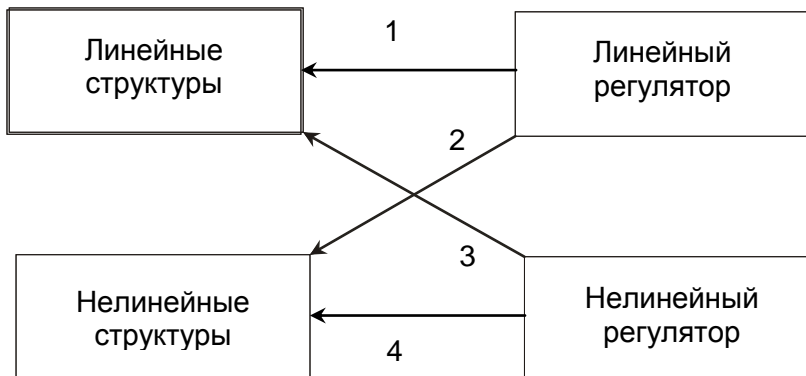


Рис. 2. Типы управления

Линейный. Линейный регулятор, управляющий линейной мостовой структурой. Здесь простой и распространенной системой управления является регулятор типа линейного квадратичного регулятора (ЛКР). Выбор такого типа закона управления основывается на предположении, что управляемый мост будет оставаться в линейной области. Преимущества законов линейного управления являются хорошо известными, легко разрабатываемыми и внедряемыми в различных приложениях по управлению мостами.

Линейно управляющий. Линейный регулятор, управляющий нелинейной структурой. Как показано на рис. 2, этот тип принадлежит ко второй категории. Примеры таких законов регулирования включают непрерывное оптимальное управление, линеаризованную обратную связь и т.д. Эта стратегия управления сохраняет преимущества линейного регулятора, и таким образом проще разрабатывать и реализовывать алгоритм управления. Однако такие линейные законы управления работоспособны в ограниченном диапазоне и когда зона действия расширяется, линейный регулятор теряет точность или устойчивость, потому что нелинейности в системе не могут быть полностью компенсированы.

Нелинейно управляющий. Нелинейный регулятор, управляющий линейной структурой. По существу, если нежелательная характеристика линейной системы может быть умышленно улучшена введением нелинейного регулятора вместо использования линейного регулятора, то нелинейный закон может быть предпочтительнее. Такой вывод является основной мотивацией для развития внешней нелинеаризационной стратегии, такой как импульсное оптимальное управление, управление скользящим методом и адаптивное управление.

Нелинейный. Нелинейный регулятор, управляющий нелинейной структурой. Резонным является управление нелинейной структурой, используя нелинейный регулятор, который может управлять нелинейностями направленно в широком диапазоне. Иногда разработка хорошего нелинейного регулятора может быть проще и естественнее его линейного двойника, так как нелинейные регуляторы глубже отражают нелинейную структуру системы. Однако, поскольку нелинейные системы могут иметь гораздо более полные и всеобъемлющие режимы, чем линейные, то в настоящее время не создано системного анализа для предсказания свойств нелинейных систем, не существует систематизированных методик для проектирования нелинейных управляющих систем. Поэтому точная идентификация, описание структурных нелинейностей и проектирование подходящего нелинейного регулятора, базирующегося на этих специфических нелинейностях, являются исключительно трудным делом.

4. Структура управляющих систем

Управляемые общестроительные, мостовые конструкции – это деформируемые системы с переменными управляемыми параметрами. В отличие от традиционных, используемых во многих областях техники конструкций, где лишь учитывают и нормируют их деформируемость, то есть стремятся преодолеть негативные последствия нагружения, переход к управлению деформированием на современном этапе открывает новые возможности для инженерного конструирования. Действительно, в настоящее время инженеры проектируют такие конструкции, которые противостоят предполагаемым заранее комбинациям внешних нагрузок. Исходя из такой идеологии, конструкции имеют высокую несущую способность или запас прочности, которые будут очень редко, а возможно и никогда использоваться полностью во время их срока жизни. Естественно, что в будущем станет возможным проектировать конструкции, которые будут самоизменяться при переменных внешних воздействиях.

Управление напряженно-деформированным состоянием (НДС) осуществляется за счет перестройки конструкции как в любой системе автоматического управления с использованием измерительной аппаратуры, объективно отражающей НДС, управляющего блока, ко-

торый оценивает НДС конструкции и формирует управляющий сигнал, а также исполнительных устройств, перестраивающих конструкцию (рис. 3) [9].

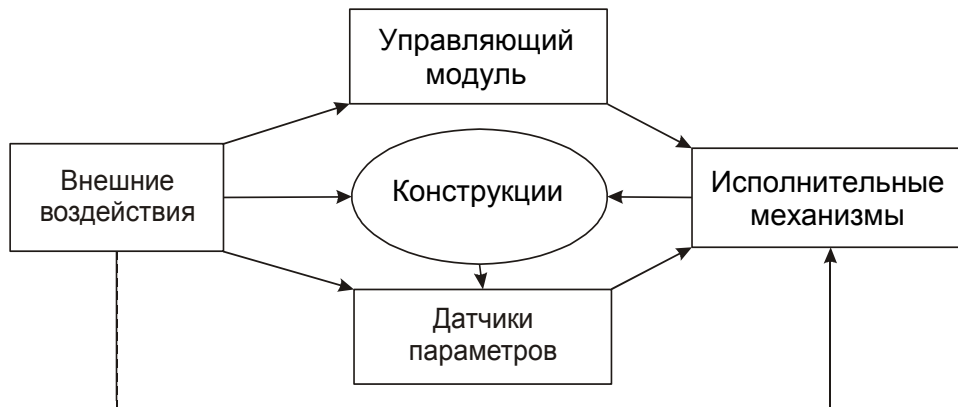


Рис. 3. Структура управляющей системы

Под перестройкой конструкции понимается изменение силовой схемы закрепления (введение дополнительных опор, поддомкрачивание), упорядочивание внутренних усилий в элементах конструкции за счет изменения натяжения, например, вантов или каких-либо других противодействий прикладываемым обычно в динамическом режиме нагрузкам.

По существующему в настоящее время мнению, в отличие от широко используемых в различных областях техники традиционно неуправляемых конструкций, автоматическое управление позволяет достичь качественно новых характеристик [1]:

- 1) снизить материалоемкость за счет рационального изменения напряженного и деформированного состояния при переменных во времени внешних воздействиях и параметрах конструкции;
- 2) обеспечить стабильность эксплуатационных характеристик и повысить надежность конструкций за счет расширения их адаптивных свойств;
- 3) улучшить характеристики управляемости механизмов путем обеспечения управления деформативностью их элементов;
- 4) повысить качество и точность изготовления на основе учета и управления деформативностью изделия и технологического оборудования;
- 5) эффективнее и полнее использовать ресурсы конструкции, повысить их эффективность в различных областях техники (в строительстве, радиотехнических устройствах, летательных аппаратах, робототехнике, машиностроении и др.), особенно там, где традиционные способы конструирования становятся малоэффективными или технически нереализуемыми;
- 6) предотвращать аварийные ситуации (разрушение конструкций);
- 7) управлять конструкцией в недоступных для человека местах.

Естественно, что преждевременное стремление к управлению конструкциями, когда не исчерпана эффективность традиционных способов их совершенствования, не может быть оправдано, однако мы полагаем, что теоретическое исследование вопросов управления конструкциями уже возможно.

5. Принципы создания и типы управляемых конструкций

Создание управляемых конструкций может базироваться на следующих принципах [1]:

- 1) энергетическом, когда регулируется перераспределение энергии в конструкции за счет главным образом электромеханических, электромагнитных приспособлений;

2) перестройки системы, изменения ее геометрического образа за счет, например, передвигающихся и изменяющих жесткость опор;

3) мобилизации внутренних резервов системы, достигаемой путем усиления опасных зон, создания разгружающих состояний путем введения предварительно напряженных элементов;

4) преобразования внешнего воздействия введением дополнительного конструктивного устройства, связанного с внешней средой и управляемой конструкцией;

5) дополнительного внешнего воздействия на конструкцию, осуществляемого специальной силовой установкой;

6) управляющей связи, когда создается и используется для управления система связи с заданным (управляемым) характером деформирования;

7) использования истории создания (сборки) системы, то есть использования таких элементов, которые вели бы себя при эксплуатации иначе, чем при изготовлении и сборке.

Обычный подход к проектированию конструкций основывается на преодолении возможных вредных воздействий (эксплуатационных нагрузок прямого назначения конструкции, а также снеговых, ветровых и прочих погодных и тектонических воздействий), которые связаны со значительным расходом энергии, рассеянной в среде, окружающей рассматриваемую конструкцию.

Нетрадиционный подход состоит в использовании части этой энергии для управления напряженно-деформированным состоянием (рис. 2). Эта энергия с использованием управляющего модуля приводит в движение исполнительные механизмы. Следовательно, управляемые конструкции являются логически обоснованным следующим шагом в развитии проектирования. Важно заметить, что и при традиционном проектировании управление применяется на стадиях конструирования, а также изготовления и монтажа, а во все остальные периоды (эксплуатация, модернизация, уничтожение) конструкция остается неуправляемой.

При проектировании управляемых конструкций кроме известных методов строительной механики, сопротивления материалов и теории упругости используются методы линейного и нелинейного, а также динамического программирования [10]. Причем эти методы находят применение при проектировании управляющих модулей (рис. 2). Конструкция рассматривается здесь в качестве объекта системы автоматического регулирования. Выделяются следующие три типа систем автоматического управления с электронным модулем:

Тип 1: оцениваются параметры напряженно-деформированного состояния в двух и более сечениях конструкции. Информация поступает на сравнивающее устройство, где вырабатывается управляющий исполнительным устройством сигнал. После направленного воздействия на конструкцию управляемые параметры напряженно-деформированного состояния приводятся к заданному состоянию. При этом величина каждого из параметров может не измеряться, поскольку целью является достижение заданных соотношений в контролируемых сечениях. Структурная схема данной системы автоматического управления изображена на рис. 3. Практическое использование такой схемы описано в задаче управления вибрациями мостов.

Тип 2: измеряется параметр изменяющейся внешней нагрузки. Информация поступает на привод исполнительного механизма, который срабатывает пропорционально параметру внешней нагрузки.

Тип 3: САУ НДС состоит из информационно-измерительной системы с достаточным количеством тензодатчиков, показания которых поступают в аналоговый модуль, идентифицирующий и рассчитывающий управляемые параметры НДС. Из управляющего модуля сигналы (в соответствии с заложенным в модуль критерием управления) поступают на приводы исполнительных механизмов.

Примером творческого применения управляемой конструкции первого типа является мост в районе села Пристанное близ Саратова в процессе строительства. Надвижка пролетов моста до 157 метров длиной осуществлялась по схеме рис. 4, где исполнительными механизмами

являлись гидравлические домкраты, управляющий модуль состоял из центрального компьютера и станции управления процессом надвижки, а чувствительными элементами являлись лазерная мишень и тензометрические датчики. Процесс надвижки пролета контролируется на экране компьютера по пяти параметрам. При этом наглядно представляются не только текущие значения этих параметров, но и допустимые для данного положения пролета их значения. При достижении этих значений процесс надвижки пролета автоматически прекращается.

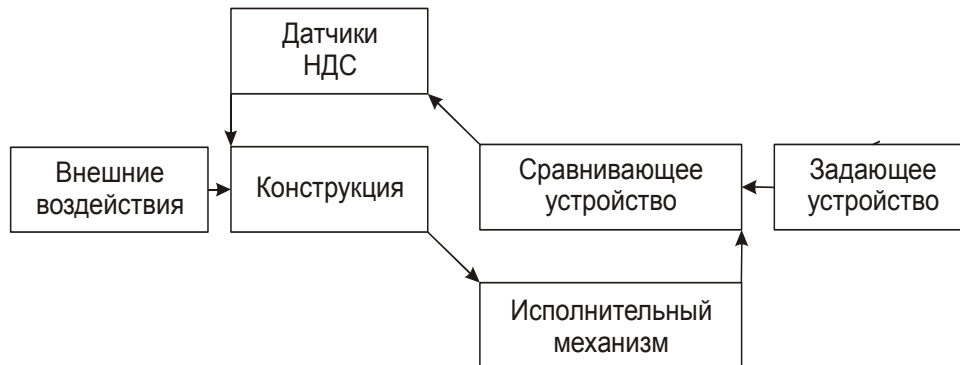


Рис. 4. Принципиальная схема надвижки пролетов моста в районе с. Пристанное у г. Саратова

Рассмотрим далее примеры управляемых конструкций по материалам российской и зарубежной печати.

6. Примеры управляемых конструкций

В настоящее время эффективность управления практически доказана в следующих конструкциях: астрономические и радиолокационные антенны, мачты кораблей, дымовые трубы, сейсмостойкие здания, вибрирующие машиностроительные системы, небоскребы [3,5,8].

Некоторые осуществляемые в настоящее время доводочные операции над строительными конструкциями могут быть отнесены к управляющим воздействиям. Например, повторное натяжение вантовых тросов в вантовых мостах есть изменение силовой схемы конструкции, то есть ее управление. Оно может быть произведено в процессе возведения моста для компенсации усадки дорожного покрытия и установки оборудования или несколькими годами позже в качестве нейтрализации эффектов усадки и ползучести бетонных плит проезжей части. Другой пример управления – поднятие зданий и сооружений для противодействия осадке грунта. В горных местностях, например, многие здания выравниваются после воздействия дождя, снега, оползня, ветра. Некоторые конструкции постоянно оборудованы выравнивающими приспособлениями, которые могут использоваться в любое время: например, виадук Chagnaiх во Франции, контрольная башня в аэропорту Kansai в Японии.

Идея создания управляемых конструкций не нова. В 1972 году Яо (Yao) предложил принцип активного контроля конструкции [4]. «Активное гашение» вибраций трубы с теоретической точки зрения изучалось Roorda J. в 1975 году [5]. В [6] описано несколько примеров современных управляемых конструкций.

Первый – это погружаемый в воду тоннель круглого поперечного сечения с почти нулевой плавучестью без полезной нагрузки. В этом случае удастся погружать очень большие пролеты. Вследствие неопределенностей (изменений температуры и солености воды, изменения плотности и объема бетона) равновесие между силами веса и выталкивающей силой плавучести неточно. Оригинальность проекторочного решения состоит в строительстве тоннеля немного меньшего веса, чем вес вытесняемой воды и компенсации любого отклоне-

ния от равновесия с помощью балластных цистерн. Контроль заполнения этих цистерн осуществляется с помощью датчиков перемещения, которые оценивают вертикальное положение тоннеля непрерывно. Естественным в этом случае является регулирование положения тоннеля и по крену.

Второй – является иллюстрацией одного из основных путей создания управляемых конструкций с помощью мощных домкратов. Эти устройства прикладывают меняющиеся силы к конструкции в зависимости от поставленных задач. Платформа Ekofisk общим весом 25000 т на шельфе в Северном море в 1987 г. была поднята на 6,5 м за 26 ч с помощью домкратов [6]. Надвижка пролетов моста Normandy была произведена с помощью 76 домкратов с 5-миллиметровым допуском в отклонении уровня поддомкрачивания [6].

Для контроля управления все чаще используются компьютеры. Они выполняют двойную функцию оценки НДС и выработки корректирующего сигнала. Поэтому в ближайшем будущем компьютерный контроль наравне с домкратами будет использоваться для создания активных сил в сооружениях с целью противодействия подвижной или ветровой нагрузке. Например, будет возможно регулировать усилия в элементах, когда подвижная нагрузка перемещается по мосту. Прикладываемые усилия могут быть отрегулированы в соответствии с величиной перемещения плиты проезжей части для минимизации перемещения, а также изгибающего момента и перерезывающей силы в плите. Этот процесс будет более эффективным для железнодорожных мостов, чем для автодорожных, так как, во-первых, нагрузка от поездов может быть лучше определена (положение, интенсивность, скорость), а, во-вторых, нагрузка от поезда представляет собой более высокий процент от проектной железнодорожной нагрузки, чем отдельный грузовик от проектной автомобильной нагрузки.

Действие управляющего усилия для компенсации подвижной нагрузки более очевидно в вантовых мостах, если каждый трос снабдить датчиком деформации и домкратом. Пока поезд пересекает мост, усилия в каждом тросе регулируются из условия минимизации прогиба плиты и изгиба пилона в опасных сечениях. Это позволит сделать длинные пролеты более тонкими, а плиты проезжей части – более дешевыми. Для неразрезных плит технически возможно погашать температурный градиент за счет активного изменения опорных усилий с использованием домкратов, размещаемых на каждой опоре.

В машиностроительных конструкциях под управлением понимается изменение этой конструкции в процессе проектирования, эксплуатации, ремонта и ее утилизации (уничтожения). Приведем несколько примеров.

В сельскохозяйственном машиностроении более 70% дизелей тракторов и комбайнов эксплуатируются после операций управления [11], которые называются капитальным ремонтом. Причем, 20-50% управленческих корректировок приходится на топливную аппаратуру [12]. Ярким примером управления конструкцией в процессе эксплуатации здесь можно привести доработку форсунки на ремонтном предприятии [12].

В электронном машиностроении управление конструкцией чаще всего распространено на этапе проектирования [13], когда различные формы и назначение изделий требуют изменения подходов к тепловым [13] и прочностным расчетам [14].

В транспортном машиностроении управление замыкается преимущественно на конструктивных размерах и параметрах в зависимости от вида материала [15,16] или энергоемкости оборудования [19].

Таким образом, управляемые машиностроительные конструкции – это деформируемые системы с переменными управляемыми параметрами. В отличие от традиционных, используемых во многих областях техники конструкций, где лишь учитывают и нормируют их деформируемость, то есть стремятся преодолеть негативные последствия нагружения, переход к управлению деформированием на современном этапе открывает новые возможности для инженерного конструирования. Действительно, в настоящее время инженеры проектируют такие конструкции, которые противостоят предполагаемым заранее комбинациям

внешних нагрузок. Исходя из такой идеологии, конструкции имеют высокую несущую способность или запас прочности, которые будут очень редко, а возможно и никогда не будут использоваться полностью во время их срока жизни. Естественно, что в будущем станет возможным проектировать конструкции, которые будут самоизменяться при переменных внешних воздействиях [20].

Выводы

Появление новых сооружений последнего десятилетия показывает, что развитие управляемых конструкций идет медленно. Объяснение такому положению следует искать в том, что для их развития нужны люди, обладающие знаниями, далекими от инженерной строительной технологии в областях [21-25]:

- механики жидкости для точного знания действия ветра;
- анализа и контроля движения;
- приборостроения и проектирования датчиков;
- передачи сигналов, анализа информации, передаваемой датчиками;
- технологии компьютерного контроля;
- стохастической динамики;
- инженерной механики проектирования приводов;
- электронной техники.

Тем не менее за управляемыми конструкциями будущее. Предполагается, что управляемые конструкции будут внедрены первоначально на крупных объектах по следующим причинам: а) они могут быть «рентабельными» только для очень больших конструкций, на которых сократится потребление конструкционного материала и тем самым окупится создание управляющей системы; б) большие конструкции с большим собственным периодом колебаний легче контролировать, потому что временной интервал для включения исполнительных устройств будет не столь коротким (следует учесть также и инерционность больших конструкций при приведении их в исходное положение, скорость, с которой это приведение должно осуществляться).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абовский Н.П. Управляемые конструкции. САУ-НДС: Учеб. пособие / КИСИ. Красноярск, 1995. 125 с.
2. Абовский Н.П. Управление деформированием отражающей способности поверхности антенн: Обзор работ // Пространственные конструкции в Красноярском крае: Сб. науч. тр. / КИСИ. Красноярск, 1998. С.56-101.
3. Управляемые конструкции (патенты и изобретения): Сборник / КИСИ. Красноярск, 1997. 135 с.
4. Yao J.T.P. Concept of structural control // Journal of the structural division Proceeding of the American Society of Civil Engineers. 1972. July. P.1567-1574.
5. Roorda J. Tendon control in tall structures // Journal of the structural division. Vol.101. March, 1975. P.505-521.
6. Montens S. A global concept for 21st century structures: PARASTRESSING // New technologies in structural engineering. Lisbon, Portugal, July 2-5,1997. Vol.1, Session 2, Innovation Structural Solutions. P.649-656.
7. Регулирование. Синтез. Оптимизация. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости: Учеб. пособие для вузов / Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, В.И. Савченков и др., Под ред. Н.П. Абовского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1993. 456 с.
8. Абовский Н.П. Управление конструкциями с использованием механических и аналоговых устройств: Учеб. пособие / КИСИ. Красноярск, 1996. 107 с.

9. Ascraft M. Vibration control of assembly stands during bridge extension // New technologies in structural engineering. Lisbon, Portugal, July 2-5, 1997. Vol.1, Session 2, Innovation Structural Solutions. P.543-549.

10. Controlling method of bridge launching process / O. Chemerinsky, V. Seliverstov, A. Chvyrev, V. Akatov, J. Nayanov. Long-Span and High-Rise Structures. IABSE symposium, Kobe, 1998. P.501-506.

11. Загородских Б.П., Ковырягин М.А., Новофастовский Д.В. Восстановление распылителей форсунок проточкой // Степные просторы. 1987. № 1. С.42.

12. Загородских Б.П., Ковырягин М.А., Новофастовский Д.В. Герметичность распылителя форсунки дизеля // Повышение надежности автотракторных дизелей при их ремонте и эксплуатации: Сб. науч. работ. Саратов: Саратов. с.-х. ин-т им. Н.И. Вавилова, 1993. С.3-13.

13. Ковырягин М.А. Методика расчета температурных полей методом элементарных балансов в сферической системе координат // Современные проблемы теплофизики, механики и термомеханики в электронном машиностроении: Материалы регион. совещ. / Саратов. политехн. ин-т. Саратов, 1991. С.26-27.

14. Ковырягин М.А. Регулируемое напряженно-деформируемое состояние двухсвязных пластин с подкрепляющим ребром по некруговому контуру // Восьмой Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов. (Пермь, 23-29 августа 2001 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С.336-337.

15. Сухоруков В.С., Ковырягин М.А., Нурмаганбетов Б.С. Обоснование рациональной формы образующей винтовой поверхности вертикального шнека / Саратов. политехн. ин-т. Саратов, 1991. 10 с. Деп. в ВИНТИ 19.03.91, №1184 В91.

16. Сухоруков В.С., Ковырягин М.А., Нурмаганбетов Б.С. Выбор формы образующей рабочей поверхности шнека для вертикального перемещения материала // Организация, технология и механизация мелиоративных работ: Сб. науч. работ. Саратов: Саратов. с.-х. ин-т им. Н.И. Вавилова. 1993. С.86-92.

17. Сухоруков В.С., Ковырягин М.А., Нурмаганбетов Б.С. К вопросу определения механической энергии на перемещении материала винтовым конвейером // Организация, технология и механизация мелиоративных работ: Сб. науч. работ. Саратов: Саратов. с.-х. ин-т им. Н.И. Вавилова. 1993. С.93-102.

18. Ковырягин М.А. Изменяемые конструкции // Направления и пути совершенствования образовательного процесса на основе современных педагогических технологий: Сб. трудов. Саратов: Воен. артил. ун-т, Поволж. отд. Акад. воен. наук. 2000. С.102-105.

19. Овчинников И.Г., Ковырягин М.А. Использование принципов активного управления конструкцией в транспортных сооружениях // Транспортное строительство. 2000. № 6. С.7-9.

20. Ковырягин М.А., Овчинников И.Г. О типах и алгоритмах управления мостовыми конструкциями // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Сб. докл. IV Всерос. семинара. Новосибирск: НГАСУ, 2002. С.178-188.

21. Мосты: история, дискуссии, новые решения, опыт: Юбил. сб. тр. каф. «Мосты» МИИТ / Ред. В.К. Блохин, И.А. Сильницкий. М.: МИИТ, 1997. 251 с.

22. Ковырягин М.А., Овчинников И.Г. Управляемые конструкции (в мостостроении). Саратов: СГТУ, 2003. 96 с.

23. Ковырягин М.А. Регулируемые конструкции / Технолог. ин-т Саратов. гос. техн. ун-та. 2002. Деп. в ВИНТИ 01.04.02 № 577-В2002. Энгельс, 2002. 45 с.

Ковырягин Михаил Алексеевич –

кандидат технических наук, доцент кафедр «Высшая математика и механика»

Энгельсского технологического института

Саратовского государственного технического университета

и «Вычислительный эксперимент в механике»

Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

В.А. Крысько, И.В. Кравцова

ДИНАМИКА И СТАТИКА СЕКТОРИАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

Исследуются стохастические колебания гибких сферических секториальных оболочек при действии равномерно распределенной знакопеременной нагрузки. Изучен характер колебаний секториальных оболочек в зависимости от величины параметра пологости. Исследованы сценарии перехода колебаний секториальных оболочек из гармонических в хаотические в состоянии хаоса на основе качественной теории дифференциальных уравнений и теории нелинейной динамики.

V.A. Krysko, I.V. Kravtsova

DYNAMICS AND STATISTICS OF SECTORIAL SHELLS

This is a research of chaotic waves of flexible spherical sectorial shells equally distributed at the process of sign-variable load. The article shows the features of waves of sectorial shells dependading on quantity of declivity parameters. The scenario of transition of waves the shell system into the condition of chaos on the base of quality theory of differential equation and the theory of nonlinear dynamics is also described in the article.

Введение

Исследованию хаотических колебаний гибких пластин и оболочек за последние годы начинает уделяться все больше внимания [1-11]. Однако анализ стохастических колебаний гибких пологих секториальных оболочек в настоящее время не проведен. Данная работа ставит своей целью заполнить указанный выше пробел.

Постановка задачи и алгоритм расчета

Рассмотрим неосесимметричную сферическую пологую оболочку, представляющую собой замкнутую двумерную область пространства R^2 в полярной системе координат, ограниченную контуром Γ , введенной следующим образом: $\bar{\Omega} = \Omega + \Gamma = \{(r, \theta, z) \mid r \in [0, b], \theta \in [0, \theta_k], z \in [-h/2; h/2]\}$. Систему уравнений динамики пологих оболочек запишем в виде [12]:

$$w'' + \varepsilon w' = -\nabla^2 \nabla^2 w + N(w, F) + \nabla^2 F + 4q,$$

$$\nabla^2 \nabla^2 F = -\nabla^2 w - N(w, w),$$

$$\text{где } \nabla^2(\cdot) = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\cdot)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \theta^2}, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \nabla^2(\cdot) = \frac{\partial^4(\cdot)}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3(\cdot)}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial(\cdot)}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^4(\cdot)}{\partial \theta^2 \partial r^2} - \frac{2}{r^3} \frac{\partial^3(\cdot)}{\partial \theta^2 \partial r} + \frac{4}{r^4} \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^4} \frac{\partial^4(\cdot)}{\partial \theta^4},$$

$$N(w, F) = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - 2 \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} \right)$$

$$N(w, w) = 2 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - 2 \cdot \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \right]^2$$

Здесь введены безразмерные величины: $\bar{t} = \omega_0 t$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma R^2}}$; $\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{g}{\gamma E}} \frac{R}{h} \varepsilon$, $\bar{F} = \eta \frac{F}{Eh^3}$;

$\bar{w} = \sqrt{\eta} \frac{w}{h}$; $\bar{r} = b \frac{r}{c}$; $\bar{q} = \bar{q}_3 = \frac{\sqrt{\eta}}{4} \frac{q_3}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^2$; $\eta = 12(1 - \nu^2)$; $b = \sqrt[4]{\eta} \frac{c}{\sqrt{Rh}}$, где t – время; ε – ко-

эффициент сопротивления среды, в которой происходит движение оболочки; F – функция усилий; w – функция перемещений; R, c – главный радиус кривизны у опорного контура и радиус опорного контура в окружном направлении соответственно; h – толщина оболочки; b – параметр пологости; ν – коэффициент Пуассона; r – расстояние от оси вращения до точки на срединной поверхности; q – параметр внешней нагрузки; ω_0 – частота собственных линейных колебаний. Для краткости черточка над безразмерными величинами в уравнении (1) опущена. Производные по t и далее будем обозначать штрихом. К системе (1) следует присоединить граничные и начальные условия, условия в вершине и условия сшивания.

Граничные условия запишутся следующим образом:

1. Шарнирное закрепление дуговой кромки:

$$w_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \tag{2}$$

$$F_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial r} = 0, \quad j = \overline{1, M-1}.$$

2. Шарнирное закрепление радиальных кромок:

$$w_{i,j} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = 0, \tag{3}$$

$$F_{i,j} = 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} = 0, \quad j = 0, j = M; i = \overline{0, N}.$$

3. Скользящее защемление дуговой кромки

$$w_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \tag{4}$$

$$F_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial r} = 0, \quad j = \overline{1, M-1}.$$

4. Скользящее защемление радиальных кромок

$$w_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0, \tag{5}$$

$$F_{N,j} = 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} = 0, \quad j = 0, j = M; i = \overline{0, N};$$

начальные условия:

$$w = f_1(r, \theta) = 0, \quad w' = f_2(r, \theta) = 0 \text{ в момент времени } t=0. \tag{6}$$

Для сведения распределенной системы (1)–(6) к системе с сосредоточенными параметрами воспользуемся методом конечных разностей с аппроксимацией $O(\Delta^2)$ по пространственным переменным r и θ (рис. 1). Систему уравнений запишем в операторной форме:

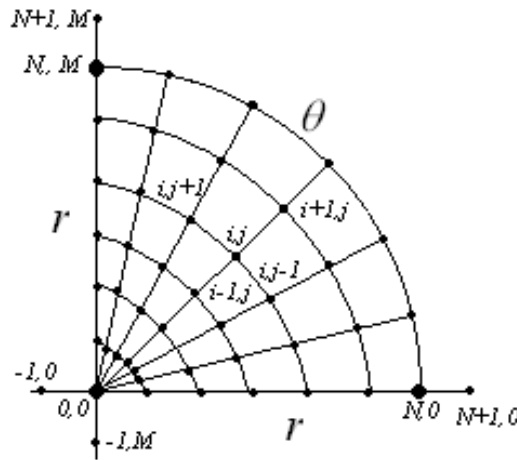


Рис. 1

$$-\Lambda(\Lambda w) + \Lambda_{rr} w (\Lambda F + \Lambda_{rr} F) + \Lambda_{rr} F (\Lambda w + \Lambda_{rr} w) - 2 \cdot \Lambda_{r0} w \Lambda_{r0} F + \Lambda F + 4q_i = (w_u + \varepsilon w_t)_{i,j},$$

$$\Lambda(\Lambda F) = -\Lambda_{rr} w (\Lambda w + \Lambda_{rr} w) + (\Lambda_{r0} w)^2 - \Lambda w,$$

$$\text{где } \Lambda(\cdot) = \Lambda_{rr}(\cdot) + \Lambda_r(\cdot), \quad \Lambda_r(\cdot) = \frac{1}{r_i^2}(\cdot)_r, \quad \Lambda_{rr}(\cdot) = (\cdot)_{rr}, \quad \Lambda_{r0}(\cdot) = -\frac{1}{r_i^2}(\cdot)_0 + \frac{1}{r_i}(\cdot)_{r0}, \quad (7)$$

$$\Lambda_{rr}(\cdot) = \frac{1}{\Delta^2} [(\cdot)_{i+1} - 2(\cdot)_i + (\cdot)_{i-1}], \quad \Lambda_r(\cdot) = \frac{1}{2 \cdot \Delta \cdot r_i^2} [(\cdot)_{i+1} - (\cdot)_{i-1}].$$

Граничные условия:

1. Шарнирное закрепление дуговой кромки

$$w_{N,j} = 0, \quad \Lambda_{rr} w - \frac{\nu}{b} \Lambda_r w = 0, \quad (8)$$

$$F_{N,j} = 0, \quad \Lambda_r w = 0, \quad j = \overline{1, M-1}.$$

2. Шарнирное закрепление радиальных кромок

$$w_{i,j} = 0, \quad \Lambda_{00} w = 0, \quad (9)$$

$$F_{i,j} = 0, \quad \Lambda_{00} F = 0, \quad j = 0, M; \quad i = \overline{0, N}.$$

3. Скользящее закрепление дуговой кромки

$$w_{N,j} = 0, \quad \Lambda_r w = 0, \quad (10)$$

$$F_{N,j} = 0, \quad \Lambda_r F = 0, \quad j = \overline{1, M-1}.$$

4. Скользящее закрепление радиальных кромок

$$w_{i,j} = 0, \Lambda_{00} w = 0, \quad (11)$$

$$F_{i,j} = 0, \Lambda_{00} F = 0, \quad j = 0, M; \quad i = \overline{0, N}.$$

К системе (6)-(10) следует добавить условия в вершине оболочки и условия сшивания.

В большинстве случаев при решении численными методами допускается, что оболочка имеет центральное отверстие малых размеров, что несущественно влияет на характер получаемых решений в достаточном удалении от вершины. В данной же работе при решении неосесимметричных задач $\theta = 2\pi$ искомые функции в точке $r=0$ задавались интерполяционной формулой Лагранжа второго порядка. Результирующее выражение имеет вид

$$f_{0,j} = 3 \cdot f_{1,j} - 3 \cdot f_{2,j} + f_{3,j}, \quad (12)$$

где $f_{i,j} = f(r_i)_j$, $r_i = i \cdot h$ ($i = 0, 1, 2, 3$), $0 \leq j \leq M - 1$, h – расстояние между узлами интерполяции. Для законтурной точки выполняется условие симметрии

$$f_{-1,j} = f_{1,j}, \quad \text{для } 0 \leq j \leq M - 1. \quad (13)$$

Условия сшивания для неосесимметричных задач $\theta = 2\pi$ запишутся в виде:

$$w_{i,j} = w_{i,M+j}, \quad F_{i,j} = F_{i,M+j} \quad \text{для } j = 0; -1, \quad 0 \leq i \leq N - 1. \quad (14)$$

Задачу Коши (7)-(14) будем решать методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Шаг по времени выбирается из условия устойчивости решения ($\Delta t = 3.90625 \cdot 10^{-3}$).

Нагрузка может изменяться по любому закону, но в работе будут исследованы задачи, когда она изменяется по следующему закону $q = q_0 \sin(\omega_p t)$, где ω_p – частота возбуждения.

Статические задачи, полученные методом установления.

Достоверность получаемых результатов

Разработанный алгоритм и комплекс программ на ПЭВМ позволяет решать задачи статики и динамики. Для решения задач статики используется метод установления, применение которого к задачам теории оболочек принадлежит В.И. Феодосьеву [13,14], идея которого заключается в следующем: для $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$ строится зависимость $\{q_m, w_m(t)\}$, где $m=1,2,\dots$ – число значений нагрузки, при которой было получено решение методом установления. Это позволяет рассчитать характеристики $q(w_{уст})$ и исследовать НДС оболочек.

На рис. 1, 2, 3 построены зависимости $q(w_{уст})$ по предлагаемому алгоритму для оболочки с углом сектора, равном $\theta_k = \frac{3}{2} \cdot \pi$ (рис. 2), для $\theta_k = \pi$ (рис. 3) и для $\theta_k = \frac{\pi}{2}$ (рис. 4)

при разных значениях параметра пологости: для $\theta_k = \frac{3}{2} \cdot \pi$ и $\theta_k = \pi$ – $b=5; 6; 7; 8; 9; 10$, а для

$\theta_k = \frac{\pi}{2}$ параметр пологости $b=7; 8; 9; 10; 11; 12$, т.к. при меньших значениях параметра пологости секториальная оболочка ведет себя как пластинка.

Как видно из графиков, начиная с некоторого значения параметра пологости b , на кривых появляются предельные точки. Расчеты показали, что для оболочки с углом сектора, равном $\theta_k = \frac{3}{2} \cdot \pi; \pi; \frac{\pi}{2}$, параметр пологости $b=8; 9; 11$ соответственно является критическим, при котором наблюдается явление «хлопка».

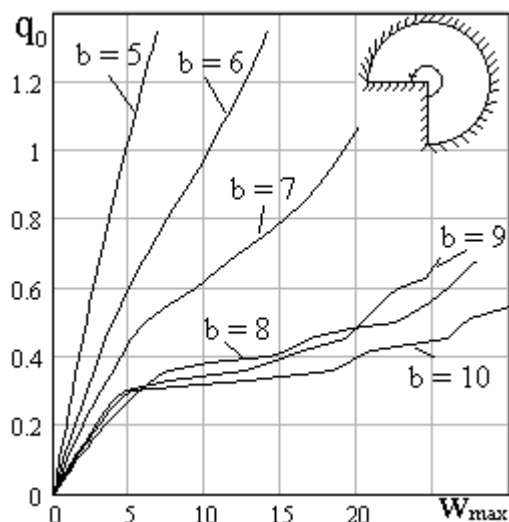


Рис. 2

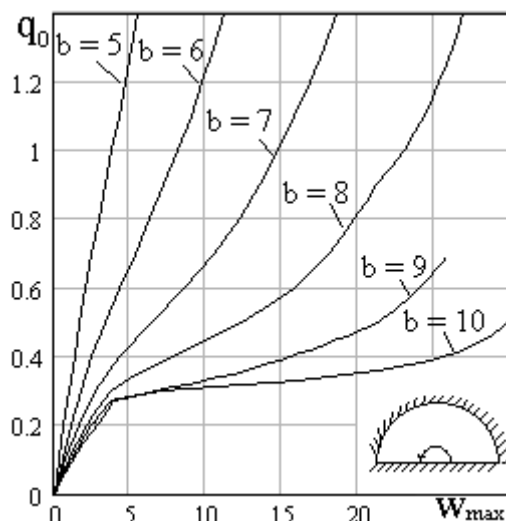


Рис. 3

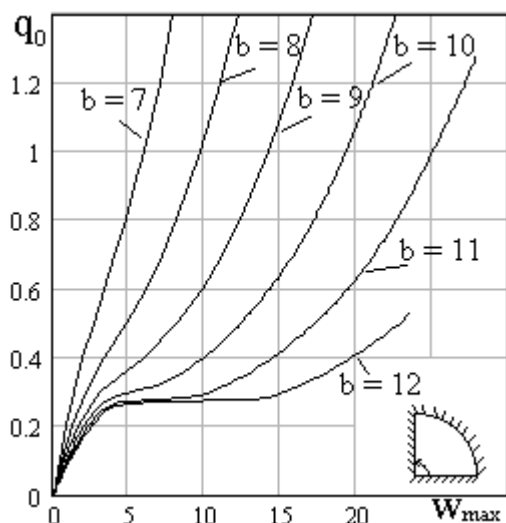


Рис. 4

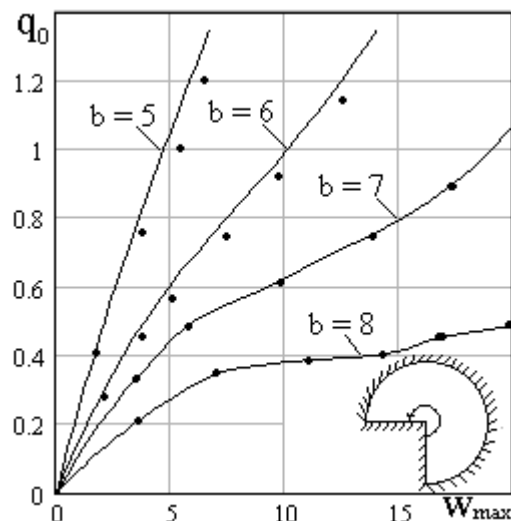


Рис. 5

Разработанный алгоритм позволяет численно решить широкий класс задач, точное решение которых отсутствует. В связи с этим существенным является подтверждение правильности проводимых вычислений. Достоверность получаемых результатов проверялась путем сравнения их с численными решениями, полученными Г.М. Губой [15]. На рис. 5 представлена зависимость $q(w_{ycm})$ для секториальной оболочки с подвижно защемленным опорным контуром по радиальной и дуговой кромке (4-5), $\theta_k = \frac{3 \cdot \pi}{2}$, параметр пологости $b=5; 6; 7; 8$; число участков деления по радиусу и углу $N=M=10$, $\nu=0,3$. Графики, отмеченные точками, получены Г.М. Губой. Сплошная линия иллюстрирует результаты, полученные авторами данной работы. Графики почти полностью совпали.

Динамика секториальных оболочек

Для того чтобы привести все многообразие распределенных систем к общему знаменателю, рассматривают их поведение в фазовом пространстве. Уравнения в частных производ-

ных, описывающие распределенные системы (1)-(6), заменяются уравнениями с сосредоточенными параметрами путем применения метода конечных разностей (7)-(14). С этой заменой связан тонкий момент, который необходимо принимать во внимание, чтобы правильно интерпретировать результаты численного счета. При исследовании конкретных систем рассматриваются не бесконечномерные системы уравнений, а усеченные системы конечной размерности. Предполагается, что с увеличением числа уравнений наступает момент, начиная с которого динамические свойства системы стабилизируются так, что дальнейший рост числа уравнений в аппроксимации не вносит ничего нового. При таком подходе существенным фактором является конечная размерность аттрактора системы. Однако даже если размерность аттракторов ограничена, весьма значительными могут оказаться эффекты, возникающие из-за обрезания (1)-(6) системы уравнений. В случае «неудачного» выбора участков деления радиуса и угла оболочки M и N в конечно-разностной схеме, которая применяется к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная усеченная система может обладать аттракторами, качественно отличающимися по свойствам от аттракторов исходной системы.

Это свойство проявляется, например, у двухмерного уравнения, описывающего тепловую конвекцию жидкости. Система Лоренца [16], представляющая собой трехмодовое усечение этого уравнения, демонстрирует сложную, в том числе хаотическую динамику. Увеличение же числа степеней свободы в системе сначала приводит к нерегулярному возрастанию области хаоса, а затем к внезапному уменьшению. При достаточно большом числе степеней свободы хаос исчезает. В работе [17] показано, что для больших чисел Прануля δ в рассматриваемой двумерной конвекции Бусинеска имеются критические значения числа Рэлея Ra для возникновения одно- и двухмодового колебательного движения, а при дальнейшем росте Ra система возвращается к периодической одночастотной конвекции. Этот пример показывает, что для получения качественно верного соответствия между динамикой исходной и усеченной системы, полученной на основе применения метода конечных разностей, необходимо учитывать довольно значительное число степеней свободы. Данный вопрос для параметрических колебаний гибких пластин изучался в работе [5].

Проанализируем характер колебания подвижно закрепленной по радиальной и дуговой кромке секториальной оболочки в зависимости от числа участков деления интервала интегрирования по координатам $r \in [0; b]$ и $\theta \in [0; \theta_k]$ методом конечных разностей. Интервалы $[0; b]$ и $[0; \theta_k]$ разбивались на 5; 10; 15; 20; 25 отрезков, т.е. увеличивалось число степеней свободы. Нагрузка – равномерно распределенная по поверхности оболочки, изменяющаяся по гармоническому закону

$$q = q_0 \sin \omega_p t . \quad (15)$$

Исследовались зависимости $w_{\max}(q_0)$, шкалы типов сигнала $\{q_0, \omega_0\}$, построенные на анализе спектра мощности и ляпуновских показателей, спектры мощности $S, db(\omega_p)$ для середины биссектрисы секториальной оболочки. Колебания во всех точках интервалов $[0; b]$ и $[0; \theta_k]$ были синхронными, поэтому анализ велся только для одной точки. Зависимости $w_{\max}(q_0)$ были построены для двух секториальных оболочек: $\theta_k = \pi, b = 9$ (рис. 6) и $\theta_k = \frac{\pi}{2}, b = 10$ (рис. 7), шкалы типов сигнала $\{q_0, \omega_0\}$ в зависимости от числа участков разбиения $N=M$ расположены под графиками. Все условные обозначения указаны на рисунке. Далее используются условные обозначения, приведенные на рис. 6. Все графики были построены на частоте собственных колебаний.

Анализ исследования показал, что уже при $N=M=15$ характер колебаний не изменяется в зависимости от числа участков деления радиуса и угла оболочки. Наблюдается лишь небольшое смещение бифуркационной зоны на шкалах типов сигнала на рис. 6, графики зависимости $w_{\max}(q_0)$ практически совпадают.

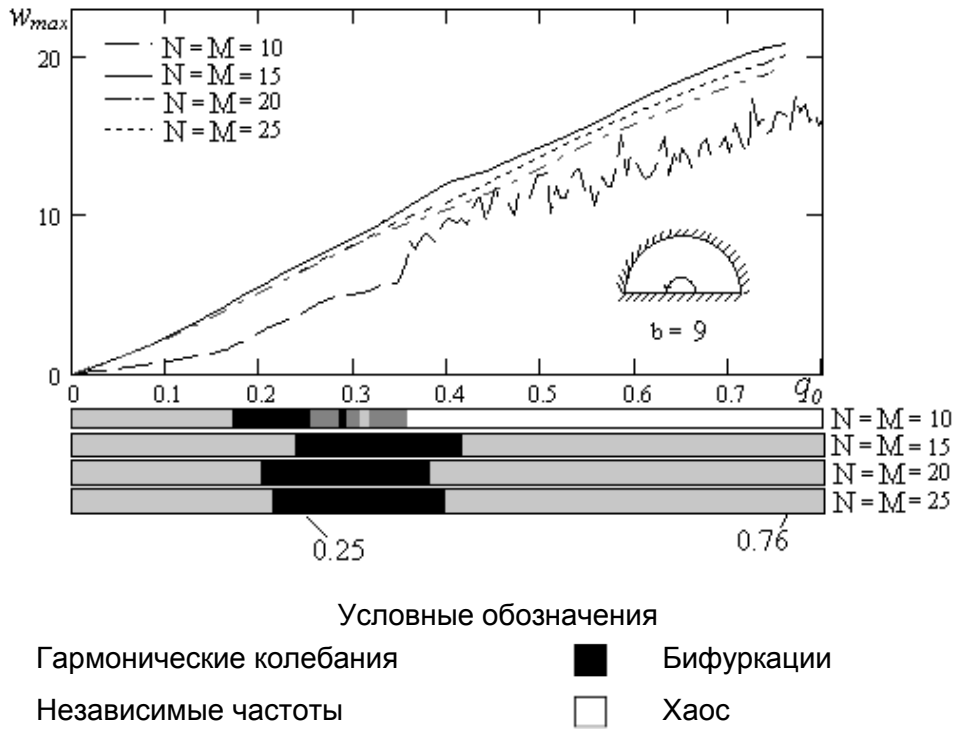


Рис. 6

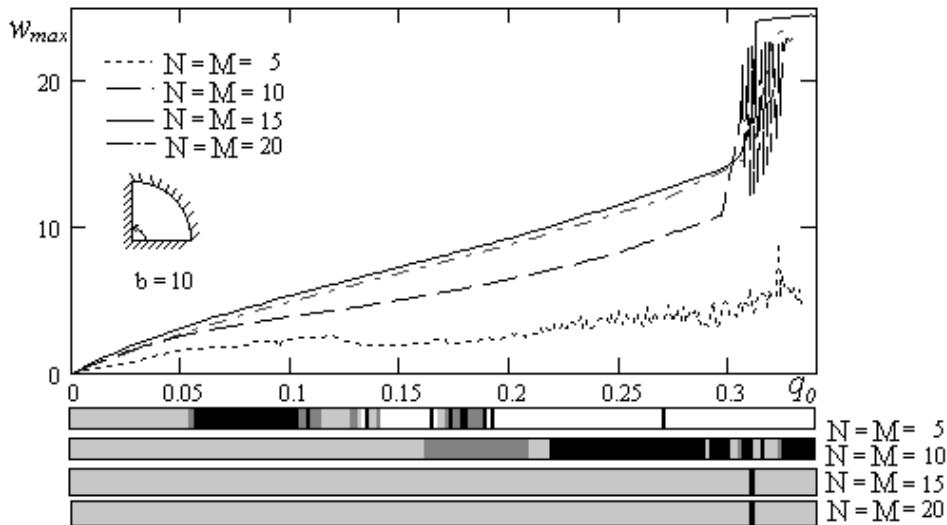


Рис. 7

На шкалах типов сигнала обозначены точки, которые были взяты для более детального анализа, графики $S, db(\omega_p)$ для них в зависимости от числа разбиения $N=M$ приведены в таблице. Рассмотрим точку на шкале типов сигнала $\{q_0, \omega_0\}$, которая при $N=M=20$ находится в зоне бифуркаций при соответствующих параметрах нагрузки: $q_0=0,25, \omega_0=0,8; \theta_k=\pi, b=9$ (рис. 8). На рис. 8 приведены сигналы $w^{(N/2; M/2; t)}$, $320 \leq t \leq 360$, а в таблице – спектры мощности $S, db(\omega_p)$ для выбранной точки. При $N=M=5$ наблюдаются хаотические колебания, $N=M=10$ – гармонические колебания, при $N=M=15; 20$ – наблюдается первая бифуркация удвоения, графики зависимости $w^{(N/2; M/2; t)}$ на рис. 8 практически совпадают. На основании

этого можно сделать вывод, что, начиная с $N=M \geq 15$, процесс бифуркаций описывается верно, поэтому было принято решение в дальнейших исследованиях использовать $N=M=15$. Аналогичные результаты в таблице приведены для секториальной оболочки с теми же параметрами и амплитудой вынуждающей нагрузки $q_0=0,76$. Сигнал в зависимости от количества участков разбиения $N=M$ представлен на рис. 9.

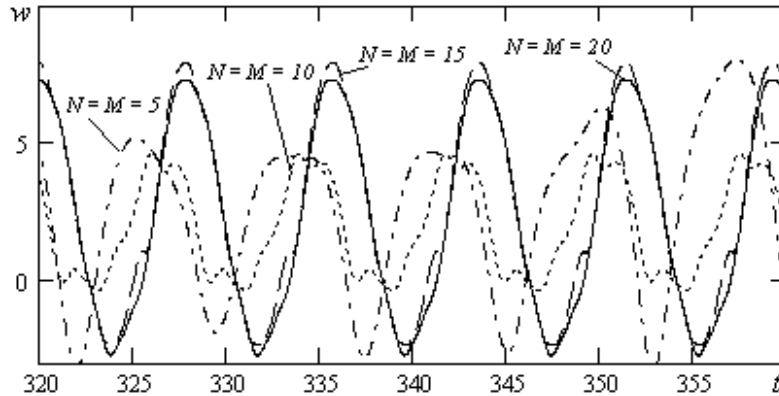


Рис. 8

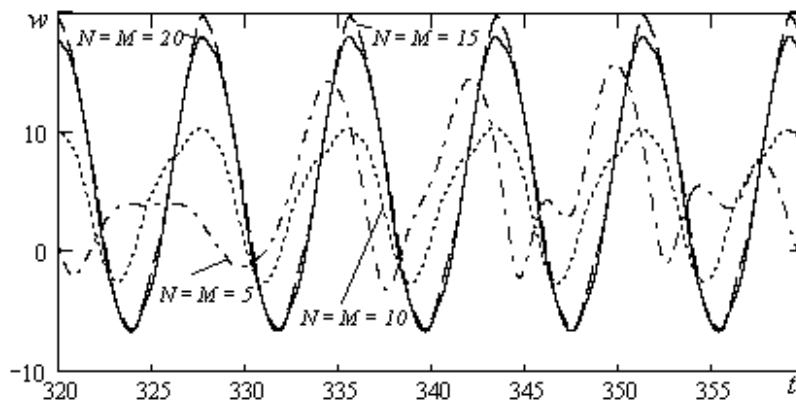
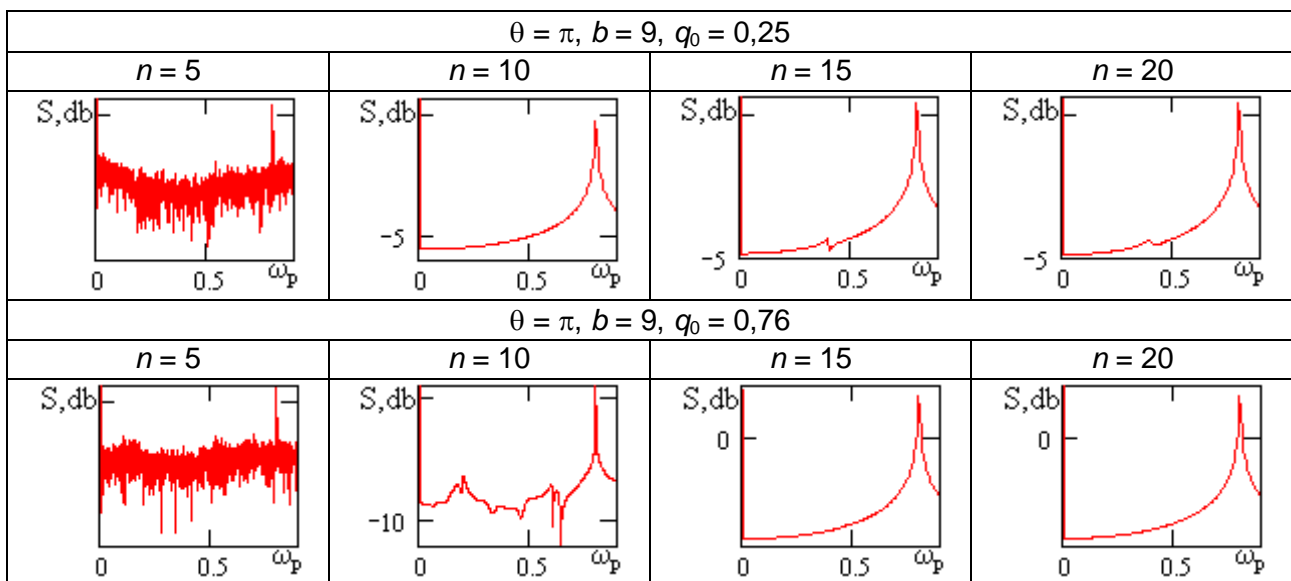


Рис. 9



Более подробно рассмотрим колебания подвижно заземленной по радиальной и дуговой кромке секториальной оболочки с углом сектора $\theta_k = \pi$ в зависимости от величины параметра пологости b . Были построены графики зависимости $w_{\max}(q_0)$ и шкалы типов сигнала (рис. 10). Анализ результатов показывает, что с увеличением параметра полости $b=11; 12$ увеличивается зона независимых частот, а в случае $b=15$ появляется зона хаотических колебаний на шкалах типов колебаний и разрывы первого рода на графике зависимости $w_{\max}(q_0)$, уменьшается зона бифуркаций и гармонических колебаний.

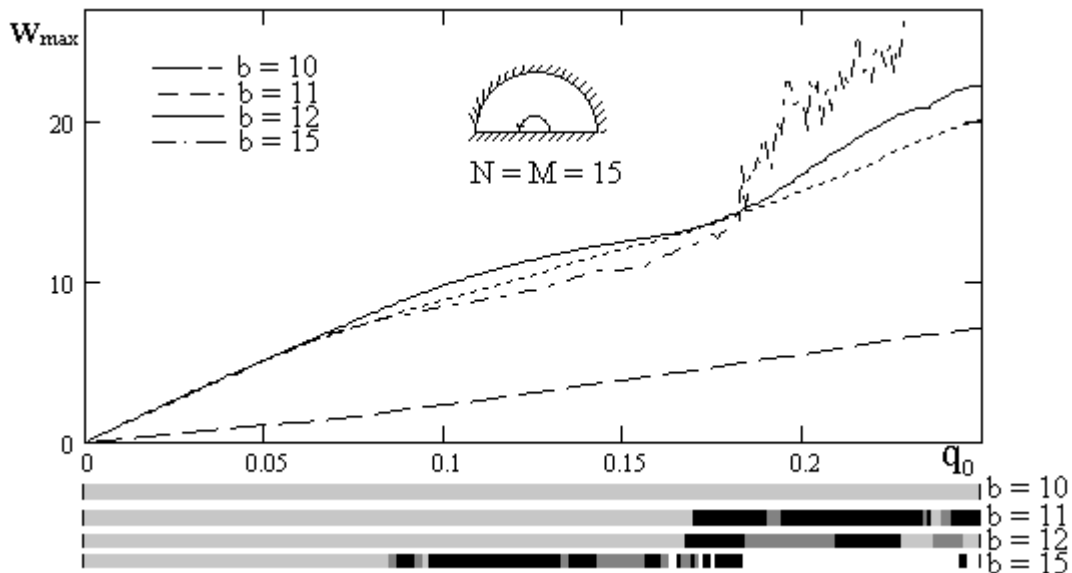


Рис. 10

Переход от гармонических колебаний к хаотическим может осуществляться по четырем известным моделям: сценарий Фейгенбаума, Рюэля-Такенса-Ньюхауза, Помо-Манневила и Ландау. Однако ни один сценарий в чистом виде не был обнаружен при исследовании колебаний секториальной оболочки под действием равномерно распределенной знакопеременной нагрузки при любом параметре пологости. Величина параметра пологости оказывает существенное влияние на эволюцию системы. Для подвижно заземленной секториальной оболочки с параметром пологости $b=12; 15$ был обнаружен новый сценарий перехода из гармонических колебаний в хаотические, который мы назвали модифицированным сценарием Рюэля-Такенса-Ньюхауза [18]. Сущность данного сценария заключается в следующем. После гармонических колебаний, совершаемых на частоте возбуждения, при движении по параметру q_0 появляется новая линейно независимая частота и переход к хаосу осуществляется через серию линейных комбинаций двух частот.

Заключение

Разработанный метод и алгоритм расчета позволяют исследовать колебания неосесимметричных оболочек при различных вариантах поперечных нагрузок, граничных условий и параметра пологости и геометрии оболочки, построить карты управляющих параметров $\{q_0, \omega_0\}$, которые управляют колебаниями оболочечных конструкций. Был найден новый сценарий перехода от гармонических колебаний к хаотическим, который мы назвали модифицированным сценарием Рюэля-Такенса-Ньюхауза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Awrejcewicz J., Krysko V.A. Nonclassical Thermoelastic Problems in Nonlinear Dynamics of shells. Application of the Bubnov – Galerkin and Finite Difference Numerical Methods. «Springer-Verlag», Berlin, New-York, London, Paris, Tokio, 2003. 430 p.
2. Awrejcewicz J.A., Krysko V.A., Vakakis A.F. Nonlinear Dynamics of Continuous Elastic Systems, «Springer-Verlag», Berlin, New-York, London, Paris, Tokio, 2004. 356 p.
3. Awrejcewicz J., Krysko V.A. Feigenbaum Scenario Exhibited by Thin Plate Dynamics // Nonlinear Dynamics 24, 2001. P.373-398.
4. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Krysko A.V. Shatal-temporal chaos an solutions exhibited by von Karmana model // J. Bifurcation Chaos. 2002. Vol.12. № 7. P.1445-1513.
5. Awrejcewicz J., Krysko V.A. Nonlinear coupled problems in dynamics of shells // Journal of Engineering Science 2003. № 41. P.583-607.
6. Awrejcewicz J., Krysko A.V. Analisis of complex parametric vibrations of plates and Shells using Bubnov-Galerkin approach // Archive of Applied Mechanics 2003. № 73. P.495-503.
7. Krysko V.A., Awrejcewicz J., Narkaitis G.G. Bifurkations of Thin Plate-Stup Excited Transversally and Axially // Nonlinear Dynamics 2003. № 32. P.87-209.
8. Krysko V.A., Awrejcewicz J., Bruk V.M. On the solution of a coupled thermomechanical problem for non-homogeneous Timoshenko-type shells // J Math. Appl. 2003. № 273. P.409-416.
9. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Krysko A.V. Complex Parametric Vibration of Flexible Rectangular Plates // Mecanica 2004. № 39. P.221-224.
10. Крысько В.А., Щекатурова Т.В. Хаотические колебания конических оболочек // Известия АН МГТ. 2004. № 4. С.140-150.
11. Крысько В.А., Кравцова И.В. Стохастические колебания гибких осесимметричных шарнирно-подвижных по контуру сферических оболочек // Известия вузов. Машиностроение. 2004. № 1. С.3-13.
12. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
13. Феодосьев В.И. Применение шагового метода к анализу устойчивости сжатого стержня // ПММ. 1963. Т.27. № 5. С.833-841.
14. Феодосьев В.И. Об одном способе решения задач устойчивости деформируемых систем // ПММ. 1963. Т.27. № 2. С.265-275.
15. Губа Г.М. Пологие секториальные оболочки при конечных прогибах. Дис. ... доктора физ.-мат. наук. Саратов: СГУ, 1986. 248 с.
16. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // Atmos. Sci. 1962. Vol.20. № 1. P.130-141.
17. Curry J.H., Herring J.R., Loncaric J., Orszag S.A. Order disorder in two- and three-dimensional Benard convection // S.Fluid Mech. 1984. Vol.147. № 1. P.1-38.
18. Krysko V.A., Kravtsova I.V. Stochastic vibrations of flexible flat axisymmetric shells exposed inhomogeneous loading // International Conference «Dynamics of system – theory and applications». Lodz, Poland, 2003. P.189-197.

Крысько Вадим Анатольевич –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

Кравцова Ирина Владиславовна –

аспирант кафедры «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

Н.Н. Макеев

НОРМАЛИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ВРАЩЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Рассматриваются пространственные колебания кинетически несимметричного абсолютно твердого тела относительно неподвижной точки закрепления O около положения устойчивого равновесия в однородном параллельном поле силы тяжести. Получен алгоритм приведения линейной части системы уравнений Эйлера-Пуассона к диагональному виду и к нормальной форме по А.М. Ляпунову [1].

N.N. Makeyev

NORMALIZATION OF EQUATIONS OF A ROTATION OF A SOLID BODY

Oscillations of a kinetically unsymmetrical absolutely solid body relatively to the fixed point near the position of the stable equilibrium in the homogeneous field of gravitation is described here. Algorithm of the reduction of the line part of the system Euler's-Poisson's equations to the diagonal form and to the normal form of Liapunov is given in this work.

Введение

Задача приведения уравнений движения неизменяемой механической системы, вращающейся вокруг неподвижного полюса, к специальному виду (условно названная нормализацией), относится к актуальным задачам динамики твердого тела. Она сводится к представлению системы уравнений движения в нормальных (в определенном смысле) переменных к форме, предпочтительной по сравнению с другими возможными формами для более эффективного решения динамических задач. К таким задачам, в частности, относятся задачи исследования устойчивости прямым методом Ляпунова [1], а также задачи стабилизации движения, орбитальной устойчивости и ряд других.

Результаты исследований такого рода находят применение не только в динамике твердого тела, но и в теории нелинейных колебаний, квантовой механике и теоретической физике.

1. Основные предпосылки

Абсолютно твердое тело, закрепленное в идеальном (без трения) сферическом шарнире (полюсе O), колеблется около нижнего положения равновесия в гравитационном поле постоянной напряженности. Предполагается, что центр тяжести тела расположен в одной из главных плоскостей его эллипсоида инерции, отнесенного к полюсу O .

Введем правые координатные ортореперы с общим началом в полюсе O : неподвижный Γ_o , одну ось которого направим вертикально вниз, и подвижный $\Gamma(Oz_1z_2z_3)$, оси которого направлены по главным в точке O направлениям тензора инерции тела.

Обозначим: $A_j (j=1, 2, 3)$ – собственные значения оператора инерции тела относительно осей репера Γ ; $\omega(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ – мгновенная угловая скорость тела, заданная её проекциями на оси

репера Γ ; $P = M g, r_1, r_2, r_3$ – вес тела и координаты его центра тяжести, заданные в осях репера Γ ; $\vec{s} (s_1, s_2, s_3)$ – направляющий орт силового поля, направленный вертикально вниз.

2. Уравнения движения твердого тела

Система уравнений Эйлера-Пуассона в осях репера Γ при данных предпосылках имеет вид [2]

$$A_1 \dot{\omega}_1 + (A_3 - A_2) \omega_2 \omega_3 = P(r_2 s_3 - r_3 s_2), \quad (1)$$

$$\dot{s}_1 = \omega_3 s_2 - \omega_2 s_3 \quad (1,2,3)$$

В системе (1) и всюду далее (1,2,3) – символ циклической перестановки величин с данными индексами.

Динамическая система (ДС) (1) аналитически замкнута относительно $(\omega_j, s_j) (j=1,2,3)$ и при известных ограничениях [2] вполне интегрируема в смысле Бурра-Лиувилля [3]. Это обусловлено существованием при данных условиях системы трех независимых первых алгебраических интегралов, находящихся в инволюции. Совокупность всех интегрируемых в указанном смысле случаев для ДС (1) образует в шестимерном пространстве параметров $A_j, r_j (j=1,2,3)$ многообразие одинаковой коразмерности $k=3$.

Обозначим

$$\begin{aligned} n_j &= r_j r^{-1}, \quad m_j = A_j A_2^1 (j=1,2,3), \\ a_1 &= \frac{1-m_3}{m_1}, \quad a_2 = m_3 - m_1, \quad a_3 = \frac{m_1-1}{m_3}, \\ b_1 &= \frac{n_1}{m_3}, \quad b_3 = \frac{n_3}{m_1}, \quad r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 \neq 0 \end{aligned}$$

и введем характерный параметр – частоту маятниковых колебаний тела относительно оси Oz_2

$$\Omega = (A_2^{-1} \text{Pr})^{1/2}. \quad (2)$$

В соответствии с принятыми условиями положим $(n_1, n_3) \geq 0, n_2 = 0 (r_2 = 0)$ и в силу (2) перейдем к безразмерным переменным

$$p_j = \Omega^{-1} \omega_j (j=1,2,3), \quad \tau = \Omega t. \quad (3)$$

Тогда уравнения ДС (1) в параметрах (2), (3) в канонической форме Коши примут вид

$$\begin{aligned} p_1' &= a_1 p_2 p_3 - b_3 s_2, \\ p_2' &= a_2 p_3 p_1 + n_3 s_1 - n_1 s_3, \\ p_3' &= a_3 p_1 p_2 + b_1 s_2, \\ s_1' &= p_3 s_2 - p_2 s_3 \quad (1,2,3), \end{aligned} \quad (4)$$

где штрих обозначает дифференцирование по τ .

Состояние устойчивого статического равновесия тела достигается в нижнем относительно полюса O положении $\vec{S}^0 (s_1^0, 0, s_3^0)$, в котором

$$n_3 s_1^0 - n_1 s_3^0 = 0, \quad n_1 s_1^0 + n_3 s_3^0 = 1, \quad (5)$$

причем

$$n_1^2 + n_3^2 = 1.$$

В силу соотношений (5) имеем $s_j^0 = n_j (j = 1, 3)$.

Для рассмотрения колебаний тела относительно положения $\vec{s} = \vec{s}^0$ введем вектор отклонения $\vec{q}(q_1, q_2, q_3)$ так, чтобы в окрестности этого положения выполнялось равенство $\vec{s}^* = \vec{s}^0 + \vec{q}$. Тогда в силу тождеств (5) ДС (4) в отклонениях примет вид

$$\begin{aligned} p_1' &= a_1 p_2 p_3 - b_3 q_2, \\ p_2' &= a_2 p_3 p_1 + n_3 q_1 - n_1 q_3, \\ p_3' &= a_3 p_1 p_2 + b_1 q_2, \\ q_1 &= p_3 q_2 - p_2 (n_3 + q_3), \\ q_2 &= p_1 (n_3 + q_3) - p_3 (n_1 + q_1), \\ q_3 &= p_2 (n_1 + q_1) - p_1 q_2. \end{aligned} \tag{6}$$

3. Диагонализация динамической системы

Под диагонализацией полной нелинейной ДС (6) здесь понимается алгоритм приведения матрицы её линейной подсистемы (ЛП) к диагональной канонической форме. Алгоритм такого рода известен [4].

Выделим в ДС (6) ЛП и получим собственные значения её матрицы: $(0, 0, -i, i, -i\delta, i\delta)$. Здесь i – мнимая единица,

$$\delta = \left(\frac{n_1^2}{m_3} + \frac{n_3^2}{m_1} \right)^{1/2} > 0 \tag{7}$$

– характерный параметр; нулевому собственному значению соответствуют простые элементарные делители.

Введем матрицу P , составленную из соответственно размещенных собственных векторов матрицы ЛП, содержащейся в ДС (6). Она является невырожденной и имеет следующую блочную структуру

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_1^* & P_4 & P_2 \end{bmatrix}.$$

Здесь $P_j (j = 1, \dots, 4)$ – блочные матрицы

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & n_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & n_3 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$P_3 = i\delta^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{n_3}{m_1} & \frac{n_3}{m_1} \\ 0 & 0 \\ \frac{n_1}{m_3} & -\frac{n_1}{m_3} \end{bmatrix}, \quad P_4 = i \begin{bmatrix} -n_3 & n_3 \\ 0 & 0 \\ n_1 & -n_1 \end{bmatrix},$$

причем матрица P_1^* получается из матрицы P_1 посредством перестановки в ней столбцов.

Для обратной матрицы имеем

$$P^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} P_5 & 2(P_1^*)^T \\ P_2^T & (P_4^*)^T \\ \delta^{-1}(P_4^*)^T & (P_2^*) \end{bmatrix}, \quad P_5 = 2\delta^{-2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ n_1 & 0 & n_3 \\ m_3 & & m_1 \end{bmatrix},$$

где верхние индексы $*$, T – символы перестановки столбцов и транспонирования, соответственно.

Матрица ЛП, содержащейся в нелинейной системе ДС (6), имеет блочную структуру

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & Q_1 \\ Q_2 & 0 \end{bmatrix},$$

где Q_1, Q_2 – блочные матрицы

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0 & -b_3 & 0 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ 0 & b_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & -n_3 & 0 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ 0 & n_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Введем вектор состояния ДС (6) $\vec{w} = (p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, q_3)$, вектор диагональных переменных $\vec{y} = (y_1, \dots, y_6)$ и в этих вектор-функциях представим ДС (6)

$$\vec{w}' = Q\vec{w} + \vec{F}(\vec{w}). \quad (8)$$

Здесь $\vec{F}(\vec{w})$ – вектор-функция, компонентами которой являются суммы соответствующих нелинейных членов ДС (6).

Линейное преобразование $\vec{w} = P\vec{y}$ приводит ДС (8) к виду

$$\vec{y}' = D\vec{y} + P^{-1}\vec{F}(P\vec{y}), \quad (9)$$

где $D = P^{-1}QP$ – диагональная матрица вида $D = \text{diag}(0, 0, -i, i, -i\delta, i\delta)$, где δ определяется равенством (7). Следовательно, ДС (9) является результатом диагонализации исходной ДС Эйлера-Пуассона.

Представим ДС (9) в проекциях на оси координатного репера Г. Обозначим

$$c_0 = m_1 m_3 \delta^2 = m_1 n_1^2 + m_3 n_3^2, \quad c_1 = -\frac{1}{2c_0} a_2 n_1 n_3, \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{1}{c_0} (\delta^2 - 1), \quad c_3 = \frac{a_2}{\delta} \left(\frac{n_1^2}{m_3} - \frac{n_3^2}{m_1} \right), \quad c_4 = \frac{m_1}{m_3} n_1^2 + \frac{m_3}{m_1} n_3^2$$

и введем характерные функции

$$\Phi(\vec{y}) = i[y_4^2 - y_3^2 + \delta(y_5^2 - y_6^2)]y_1 + [c_1 y_2 + ic_2 \delta^{-1}(y_5 - y_6)y_2(y_3 + y_4)], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Psi(\vec{y}) = & \frac{1}{2}i(y_4^2 + \delta y_6^2) - c_1 [c_0 y_2^2 + (1 - \delta)y_5^2 + (1 + \delta)y_6^2 - 2y_5 y_6] + \\ & + \left[-\frac{1}{2}i\delta y_1 + c_1(1 - \delta)y_3 + c_1(1 + \delta)y_4 \right] y_6 \left(y_5 - \frac{1}{2}y_6 \right) + \\ & + \frac{1}{2}i \left[y_1 \left(y_3 + \frac{1}{2}y_4 \right) + (c_3 - 1)y_2 y_5 - (c_3 + 2)y_2 y_6 \right] y_4 + \\ & + \frac{1}{2}i \left[\left(1 - \delta + \frac{c_4}{\delta} \right) y_3 + \frac{1}{\delta}(c_4 - 1)y_4 \right] y_2 y_6 + R(\vec{y}). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $R(\vec{y})$ – произвольная функция компонент $y_j (j=1, \dots, 6)$ (присоединенная функция), дифференцируемая по y_4, y_6 , и такая, что

$$\frac{\partial R}{\partial y_4} = \left[\frac{1}{2} i \left(1 + \frac{1-c_4}{\delta} \right) y_2 + c_1 (1+\delta) \left(\frac{1}{2} y_6 - y_5 \right) \right] y_6, \quad (13)$$

$$\frac{\partial R}{\partial y_6} = \left[\frac{1}{2} i (c_3 + 1) y_2 - 2c_1 y_5 + 2c_1 (1+\delta) y_6 \right] y_4.$$

С учетом соотношений (10)-(13) ДС (9) можно представить в виде

$$y''_{\tau} = \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\tau}} (r=1,2), \quad y'_5 = \frac{\partial \Psi}{\partial y_5} (s=4,6). \quad (14)$$

Уравнения, содержащие y'_3, y'_5 , в ДС (14) явно не представлены, поскольку переменные y_3, y_5 комплексно сопряжены величинам y_4, y_6 соответственно: $y_3 = \bar{y}_4, y_5 = \bar{y}_6$. Поэтому не представленные уравнения без затруднений могут быть восстановлены по заданным уравнениям ДС (14).

Таким образом, система соотношений (10)-(14) является ДС уравнений пространственных колебаний твердого тела относительно неподвижного полюса, выраженной в отклонениях, ЛП которой приведена к диагональной канонической форме.

4. Приведение динамической системы к форме Ляпунова

Введем матрицы

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad N = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ 1 & i \end{bmatrix}, \quad \Lambda = E + 2N.$$

Проведение вычислений показывает, что Λ – матрица линейного преобразования, приводящая ДС (14) к ляпуновской кососимметрической форме [1]. Тогда матрица L результирующего преобразования ДС (8) в систему ляпуновской формы является неособой и имеет вид $L=P\Lambda$, где матрица P представлена выше.

Матрица преобразования Ляпунова L для ДС (8) и её блочные матрицы $L_{\tau} (r=1,2,3)$ имеют следующую структуру

$$L = \begin{bmatrix} P_1 & L_1 & L_2 \\ P_1^* & L_3 & L_1 \end{bmatrix}, \quad L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \frac{1}{\delta} \begin{bmatrix} 0 & \frac{n_3}{m_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{m_3} \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} 0 & -n_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & n_1 \end{bmatrix}.$$

Выполняя линейное преобразование $\vec{w} = L\vec{x}$, где $\vec{x} = (x_1, \dots, x_6)$ – вектор переменных Ляпунова, приведём ДС (8) к ляпуновскому виду.

Обозначим $c_5 = \delta^{-1} c_4 - \delta$ и введем характерные функции

$$U_1(\vec{x}) = (-x_3 x_4 + \delta x_5 x_6) x_1 + \left(c_1 x_2 + \frac{1}{\delta} c_2 x_6 \right) x_2 x_3, \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 U_2(\bar{x}) &= (-x_4 - 2c_0x_2^2 + 2c_1x_6^2 + c_3x_2x_6)x_3 + \\
 &+ (x_3 - x_1x_3 - x_2x_5 + 2\delta c_1x_5x_6)x_4 + W_2(\bar{x}), \\
 U_3(\bar{x}) &= [\delta(-1 - x_1 + 2c_1x_4)x_6 + x_2x_4]x_5 + \\
 &+ (\delta x_5 + c_5x_2x_3 - c_1x_3x_6)x_6 + W_3(\bar{x}).
 \end{aligned}$$

Здесь $W_2(\bar{x}), W_3(\bar{x})$ – присоединенные функции, дифференцируемые по x_3, x_4 и x_5, x_6 , соответственно, и такие, что

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial W_2}{\partial x_3} &= (x_1 - 1)x_4, \quad \frac{\partial W_2}{\partial x_4} = x_3, \quad \frac{\partial W_3}{\partial x_5} = -\delta x_6, \\
 \frac{\partial W_3}{\partial x_6} &= \delta(1 + x_1 - 2c_1x_4)x_5.
 \end{aligned} \tag{16}$$

С учетом соотношений (15), (16) ДС (8) представима в ляпуновской форме

$$\begin{aligned}
 x'_p &= \frac{\partial U_1}{\partial x_p} (p=1,2), \quad x'_r = \frac{\partial U_2}{\partial x_r} (r=3,4), \\
 x'_s &= \frac{\partial U_3}{\partial x_s} (s=5,6),
 \end{aligned} \tag{17}$$

где функции $U_j (j=1,2,3)$ могут быть истолкованы как некоторые квазипотенциалы.

5. Комментарий

Преобразования диагонализации и нормализации, применяемые к автономным ДС, способствуют более эффективному построению интегрального многообразия этих систем в рамках поставленных интегрируемых задач динамики твердого тела.

Приведённым выше результатам можно придать определённое истолкование. Если отвлечься от конкретных физических размерностей величин $y_j, x_j (j=1, \dots, 6)$ и соответствующих им характерных функций, то, введя в шестимерном евклидовом пространстве-времени (R^6, τ) обобщенные координаты q_j , такие, что $q_j=y_j$ или, соответственно, $q'_j = x_j (j=1, \dots, 6)$, можно утверждать следующее.

В ДС (14), (17) величины y'_j, x'_j являются обобщенными ускорениями по τ , а функции $\Phi, \Psi, U_n (n=1,2,3)$ – некоторыми гипотетическими аналогами кинетических потенциалов («потенциальных» функций, зависящих от обобщенных скоростей).

Таким образом, ДС (14), (17) имеют структуру, формально идентичную структуре системы динамических уравнений плоского движения материальной точки единичной массы в плоском потенциальном силовом поле ([5, с.364]). При этом данное сравнительное истолкование относится к каждой паре отдельно взятых уравнений данных систем.

Как известно [3], конфигурационным многообразием твердого тела с неподвижным полюсом является группа вращений $SO(3)$ трехмерного евклидова пространства R^3 , а состояние тела (его ориентация и скорость) определяется точкой шестимерного многообразия $T SO(3)$ – касательного расслоения конфигурационного многообразия $SO(3)$. Этим и определяется принятый подход к рассмотренной здесь задаче.

Система уравнений колебаний твердого тела, представленная в переменных Ляпунова, имеет предпочтение перед другими представлениями и потому, что функция Ляпунова V ,

составленная в виде связки первых алгебраических интегралов ДС (17) по Четаеву [6], имеет наипростейший (канонический) вид

$$V(\vec{x}) = \|\vec{x}\|^2 + (c_0 - 1)x_2^2 .$$

Эта функция является положительно определенной квадратичной формой всех переменных при любых допустимых значениях структурно-динамических параметров твердого тела.

Рассмотрим некоторые частные случаи, следующие из полученных результатов. В случае осевой кинетической симметрии тела вида $A_1=A_3$ имеем $a_2=0$, $a_3=-a_1$, $m_1=m_3$, $\delta=(m_1)^{-1/2}$, $c_0=m_1$, $c_1=c_3=0$, $c_4=1$, что упрощает соответствующие выражения. В частности,

$$\frac{\partial R}{\partial y_4} = \frac{1}{2}iy_2y_6, \quad \frac{\partial R}{\partial y_6} = \frac{1}{2}iy_2y_4 . \quad (18)$$

При центральной кинетической симметрии тела $A_1=A_2=A_3$ имеем $a_j = 0$, $m_j = 1 (j=1,2,3)$, $b_r = n_r (r=1,3)$, $\delta=1$, $c_0 = c_4 = 1$, $c_p = 0 (p=1,2,3,5)$, и упрощенные выражения принимают вид

$$\Phi(\vec{y}) = i(-y_3^2 + y_4^2 + y_5^2 - y_6^2),$$

$$\Psi(\vec{y}) = \frac{1}{2}i \left\{ y_4^2 + y_6^2 - y_1y_6 \left(y_5 - \frac{1}{2}y_6 \right) + \left[y_1 \left(y_3 + \frac{1}{2}y_4 \right) - y_2y_5 - 2y_2y_6 \right] y_4 + y_2y_3y_6 \right\} + R(\vec{y}) ,$$

$$U_1(\vec{x}) = (-x_3x_4 + x_5x_6)x_1$$

$$U_2(\vec{x}) = -(x_4 + 2x_2^2)x_3 + (x_3 - x_1x_3 - x_2x_5)x_4 + W_2(\vec{x})$$

$$U_3(\vec{x}) = (x_2x_4 - x_1x_6)x_5 + W_3(\vec{x})$$

При этом в данном случае сохраняются выражения (18), а между матрицами имеют место зависимости $P_3 = P_4$, $Q_1 = Q_2$, $L_2 = L_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950. 472 с.
2. Голубев В.В. Лекции по интегрированию уравнений движения тяжелого твердого тела около неподвижной точки. М.: Гостехиздат, 1953. 288 с.
3. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1974. 432 с.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики: В 5 т. М.: Наука, Т.3, ч.1. 1967. 324 с.; ч.2. 1969. 672 с.
5. Уиттекер Е.Т. Аналитическая динамика. М.; Л.: Гостехиздат, 1937. 500 с.
6. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. М.: Наука, 1965. 207 с.

Макеев Николай Николаевич –

доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Института проблем точной механики и управления РАН

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 621. 922.025: 621. 923. 1

Н.И. Веткасов

СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований стойкости композиционных шлифовальных кругов с радиальными пазами и прорезями, заполненными твердым смазочным материалом, при круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании торцом круга.

N.I. Vetkasov

RESISTANCE OF COMPOSITE CRINDING WHEELS

This article demonstrates the results of experimental researches of stability of composite wheels with radial slots and cross-hatchings which have been filled in with rigid lubricant are adduced at round outdoor, in-house and planar grinding by a back of a circle.

Перспективным направлением повышения эффективности шлифовальных операций является применение композиционных шлифовальных кругов (КШК), на стойкость которых существенно влияют число и размеры конструктивных элементов (пазов, прорезей или каналов), заполненных твердым смазочным материалом (ТСМ).

Исследования стойкости КШК проводили при круглом наружном шлифовании заготовок из стали ШХ15, HRC 63...65, при внутреннем шлифовании заготовок из сталей 30ХГСА, HRC 32...37 и 40Х, HRC 41...45 и при плоском шлифовании торцом чашечного круга заготовок из сталей ХВГ, HRC 54...56 и Р6М5, HRC 63...65.

Круглое наружное шлифование выполняли КШК с радиальными пазами на керамической и бакелитовой связке, номенклатура которых представлена в табл. 1. За базу для сравнения принимали результаты шлифования стандартным кругом такого же типоразмера и характеристики. Заготовки из стали ШХ15 шлифовали на круглошлифовальном станке с подачей поливом 3%-ной эмульсии Укринол-1М с расходом (5-6) дм³/мин на 10 мм высоты круга.

В результате исследований подтверждено, что при круглом наружном шлифовании КШК во всех случаях имели больший период стойкости, чем стандартные круги тех же размеров и характеристик (круги К1 и К2, рис. 1). Повышение стойкости кругов при этом было довольно существенным и достигало (50-100)% (круги К2 и К7, рис. 1). Наибольшее значе-

ние τ_c при шлифовании имел круг К7 с максимальным числом пазов $z_n=24$. Лишь круг К4 имел τ_c , равный периоду стойкости круга К1.

Таблица 1

Номенклатура шлифовальных кругов 1-250×25×76, использованных при проведении стойкостных испытаний

Обозначение круга	Характеристика круга	Количество пазов в КШК	Состав ТСМ*
К1	СК – 24А40НСМ17К5	0	–
К2	СК – 24А40НС17К5	0	–
К3	КШК – 24А40НСМ17К5	8	ТСМ1
К4		8	ТСМ2
К5		16	ТСМ1
К6		16	ТСМ2
К7		24	ТСМ1
К8		24	ТСМ2
К9	СК – 24А40НСМ17Б	0	–
К10	СК – 24А40НС17Б	0	–
К11	КШК – 24А40НСМ17Б	8	ТСМ1
К12		8	ТСМ2
К13		16	ТСМ1
К14		16	ТСМ2
К15		24	ТСМ1
К16		24	ТСМ2

* – ТСМ1 – графит ГЛ1, пульвербакелит, декстрин (соответственно 70, 29 и 1% по массе);
– ТСМ2 – графит ГЛ1, технический воск, хлорид калия, сера (соответственно 40, 50, 5 и 5% по массе)

Сопоставление периодов стойкости всех испытанных кругов (см. рис. 1) привело к заключению, что по этому критерию преимущества имели КШК с пазами, заполненными ТСМ1 – 70% графита ГЛ1, 29% пульвербакелита, 1% декстрина. КШК, пазы которых были заполнены ТСМ2 на основе технического воска, имели также больший, чем у стандартных кругов, период стойкости, однако «прирост» τ_c этих кругов с увеличением числа пазов z_n был не таким значительным, как при шлифовании КШК, пазы которых были заполнены ТСМ1, и не превышал 25%. Исключение составил круг К6 с $z_n=16$, период стойкости которого на 50% превысил период стойкости СК. Важной закономерностью явилось увеличение периода стойкости КШК с увеличением числа пазов z_n как при шлифовании с выхаживанием, так и без него.

При постоянной протяженности радиального паза t'_n увеличение числа пазов z_n равнозначно увеличению параметра ν КШК. Тот факт, что параметр ν существенно влияет на его стойкость (особенно при $\nu \geq 0,2$), свидетельствует о существенном влиянии теплоты, выделяющейся в зоне шлифования, на процесс снятия стружки и затупления режущих и давящих зерен. В связи с этим, очевидно, что увеличение протяженности пазов КШК является средством повышения производительности при обеспечении нормированного значения периода их стойкости. Однако чрезмерное увеличение протяженности радиальных пазов нецелесообразно, так как под действием динамических ударов из-за наличия высокочастотных колебаний большой амплитуды интенсифицируется износ кругов и снижается период их стойкости. Оптимальное значение параметра ν , при котором достигается максимальное снижение средней контактной температуры T_k и высокая стойкость КШК, находится в диапазоне 0,2-0,4.

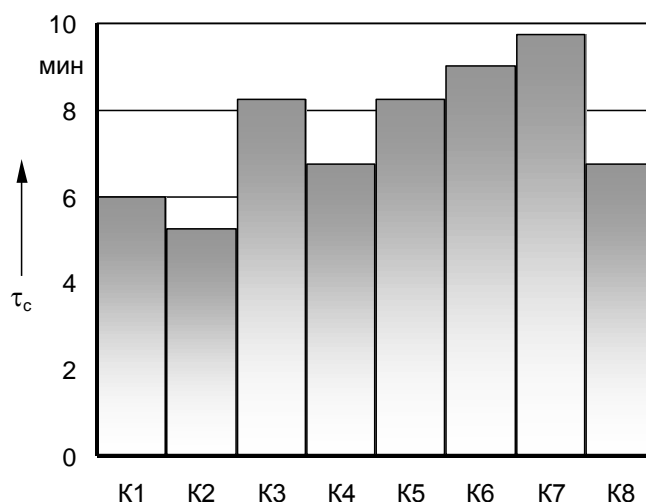


Рис. 1. Периоды стойкости τ_c испытанных кругов по критерию появления прижогов или огранки на шлифованных поверхностях заготовок: K1-K8 – обозначение круга по табл. 1; $V_k=35$ м/с; $V_s=35$ м/мин; $S_{sp}=0,35$ мм/мин; выхаживание продолжительностью 5 с; материал заготовки – сталь ШХ15, HRC 61...65; СОЖ – 3%-ная эмульсия Укринол-1М; снимаемый припуск $z=0,5$ мм

Как и при шлифовании КШК на керамической связке, периоды стойкости КШК на бакелитовой связке (см. рис. 2) превысили периоды стойкости соответствующих стандартных кругов K9 и K10. Подтвердилось также преимущество КШК с пазами, заполненными графитом, пульвербакелитом и декстрином: круги K13 и K15 по значениям τ_c превосходили круги K14 и K16 (см. рис. 2). Период стойкости возрастал также и при увеличении z_n : рост τ_c составил от 17 до 50% при увеличении z_n с 8 до 24 соответственно.

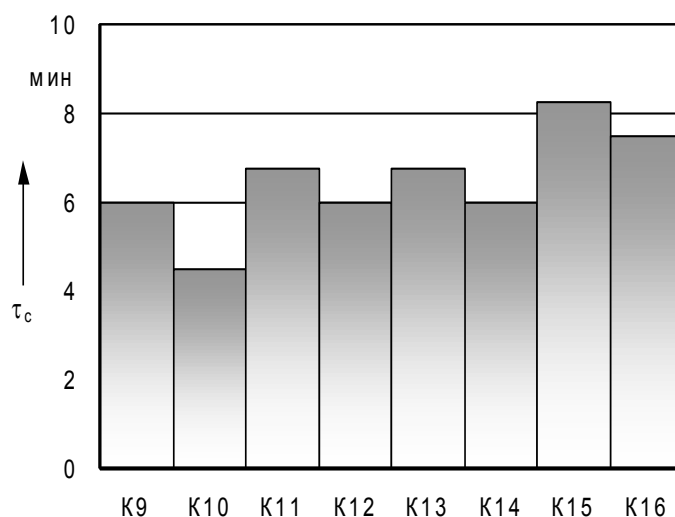


Рис. 2. Периоды стойкости τ_c испытанных кругов: K9-K16 – обозначение круга по табл. 1; $V_k=35$ м/с; $V_s=35$ м/мин; $S_{sp}=0,35$ мм/мин; выхаживание продолжительностью 5 с; материал заготовки – сталь ШХ15, HRC 61...65; СОЖ – 3%-ная эмульсия Укринол-1М; снимаемый припуск $z=0,5$ мм

С целью более всестороннего исследования влияния условий шлифования на стойкость КШК 1–250×25×76 с радиальными пазами на керамической связке проведен многофакторный эксперимент 2^4 , в ходе которого варьировали число пазов z_n , твердостью $T_{вк}$ и зернистостью $З_k$ КШК и скоростью врезной подачи $S_{вп}$.

По материалам экспериментальных исследований построена регрессионная зависимость для расчета периода стойкости КШК при круглом наружном шлифовании с врезной подачей:

$$\begin{aligned} \tau_c = & 462,9 - 15,12 \cdot S_k - 9,78 \cdot T_{вк} - 6,89 \cdot z_n - 1284,4 \cdot S_{вп} + 0,44 \cdot S_k \cdot T_{вк} + \\ & + 0,36 \cdot Z_k \cdot z_n + 42,18 \cdot Z_k \cdot S_{вп} + 0,32 \cdot T_{вк} \cdot z_n + 30,08 \cdot T_{вк} \cdot S_{вп} + 34,73 \cdot z_n \cdot S_{вп} - \\ & - 0,02 \cdot S_k \cdot T_{вк} \cdot z_n - 1,29 \cdot Z_k \cdot T_{вк} \cdot S_{вп} - 1,4 \cdot Z_k \cdot z_n \cdot S_{вп} - 1,41 \cdot T_{вк} \cdot z_n \cdot S_{вп}. \end{aligned}$$

Полученная модель прошла проверку на однородность дисперсий, значимость коэффициентов регрессии и адекватность с помощью критериев Кохрена $G_{кр}$, Стьюдента $t_{кр}$ и Фишера $F_{кр}$, значения которых определили по справочной литературе для рассчитанных чисел степеней свободы и параллельных опытов ($G_{кр}=0,2419$; $t_{кр}=2,0003$; $F_{кр}=2,17$). Проверка показала, что расчетные значения критериев G_p , t_p , F_p не превышали их критических значений ($G_p < G_{кр}$; $t_p < t_{кр}$; $F_p < F_{кр}$).

По представленной модели построили графики изменения стойкости КШК в зависимости от числа пазов z_n , твердости $T_{вк}$, зернистости $З_k$ КШК и скорости врезной подачи $S_{вп}$ (рис. 3).

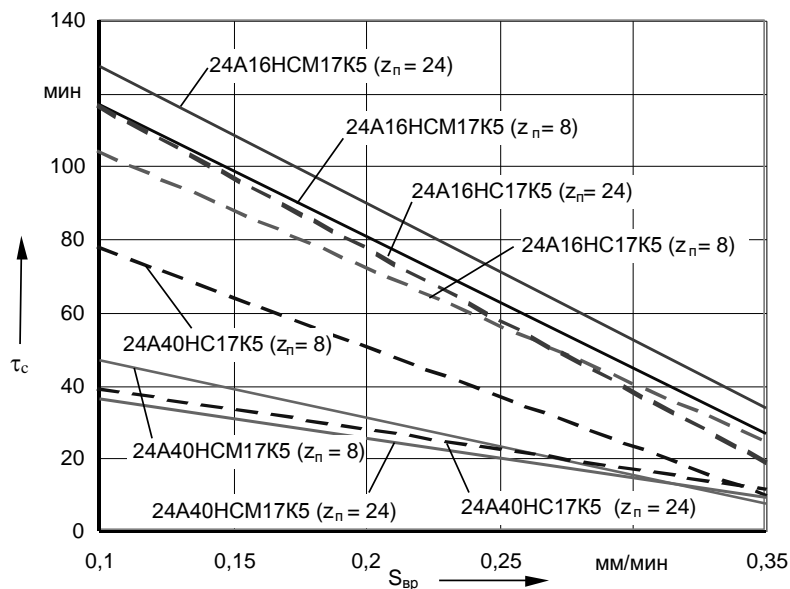


Рис. 3. Зависимость периода стойкости τ_c КШК 1–250×25×76 от скорости врезной подачи $S_{вп}$, зернистости $З_k$, твердости $T_{вк}$ и числа пазов z_n КШК: $V_k=35$ м/с; $V_3=35$ м/мин; абразивный материал – электрокорунд белый 24А; материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 61...65; СОЖ – 3%-ная эмульсия Укринол-1М; ТСМ – 70% графита серебристого; 29% пульвербакелита; 1% декстрина; снимаемый припуск $z=0,5$ мм; — — — — — твердость круга СМ1; — — — — — твердость круга С1

Как следует из рис. 3, больший период стойкости по сравнению с композиционными кругами зернистости 40 имели КШК зернистости 16. С увеличением скорости врезной подачи $S_{вп}$ с 0,1 до 0,35 мм/мин разница τ_c кругов зернистости 16 и 40 сохраняется неизменной на уровне (35–65)%, хотя абсолютные значения τ_c всех кругов уменьшились на (70–74)%. При этом период стойкости кругов твердостью СМ1 с увеличением зернистости снижается более

резко, чем τ_c кругов твердости С1. Это снижение составило (60-70)% у кругов твердостью СМ1 против (25-35)% у кругов твердостью С1 (рис. 3). Отмечено также, что с увеличением числа пазов z_n и уменьшением твердости круга стойкость τ_c КШК зернистости 16 растет, а τ_c КШК зернистости 40 уменьшается. На наш взгляд, это связано с особенностями условий работы зерен разных размеров при усилении, с одной стороны, смазочного действия ТСМ и уменьшении, с другой стороны, количества режущих зерен на рабочей поверхности КШК. Известно, что в процессе работы мелкие зерна выкрашиваются из связки, а крупные – скалываются, образуя большое количество новых режущих кромок. С уменьшением твердости круга и увеличением числа пазов z_n возрастает интенсивность выкрашивания режущих зерен из связки и уменьшается количество сколов режущих зерен с образованием новых режущих кромок, что, в конечном итоге, обуславливает различный характер изменения τ_c КШК зернистости 16 и 40. Наибольший период стойкости во всем диапазоне значений врезной подачи $S_{вр}$ имел круг 24А16НСМ17К5 с двадцатью четырьмя радиальными пазами.

Сравнение периода стойкости КШК 5–60×40×20 24А25НСМ17Б с периодами стойкости СК и ПШК такого же типоразмера и характеристики проводили по результатам внутреннего шлифования заготовок из сталей 30ХГСА и 40Х на универсальном круглошлифовальном станке мод. 3А110В, оснащенном внутришлифовальной головкой. КШК и ПШК имели шесть радиальных прорезей, параметр ν при этом был равен 0,24. Прорези КШК были заполнены ТСМ – графит ГЛ1 (75%) и технический воск (25%). Шлифовали заготовки с подачей поливом 0,5%-ного водного раствора кальцинированной соды с расходом 3,5 дм³/мин. Варьировали продольной подачей шлифовального круга S_n в диапазоне (0,5-2,0) м/мин.

Как и при круглом наружном шлифовании заготовок из стали ШХ15, период стойкости испытанного КШК на бакелитовой связке превысил периоды стойкости соответствующих стандартного и прерывистого кругов (рис. 4) как при шлифовании заготовок из стали 30ХГСА, так и при шлифовании заготовок из стали 40Х. Прирост τ_c КШК по сравнению со стойкостью СК при внутреннем шлифовании заготовок из стали 30ХГСА составил 93%, заготовок из стали 40Х – 170%. По сравнению с ПШК период стойкости КШК увеличился в среднем на (8-10)%. Наибольший прирост τ_c КШК по сравнению с τ_c СК достигал при шлифовании с $S_n=0,5$ м/мин. Очевидно, что повышение стойкости КШК по сравнению с τ_c СК при шлифовании с $S_n=0,5$ м/мин связано как с усилением смазочного действия ТСМ, так и с периодическим прерыванием процесса шлифования. Причем, за счет прерывистости рабочей поверхности круга стойкость КШК увеличилась на 57%, а за счет смазочного действия ТСМ – на 38% при шлифовании заготовок из стали 30ХГСА и соответственно на 110 и 60% при шлифовании заготовок из стали 40Х.

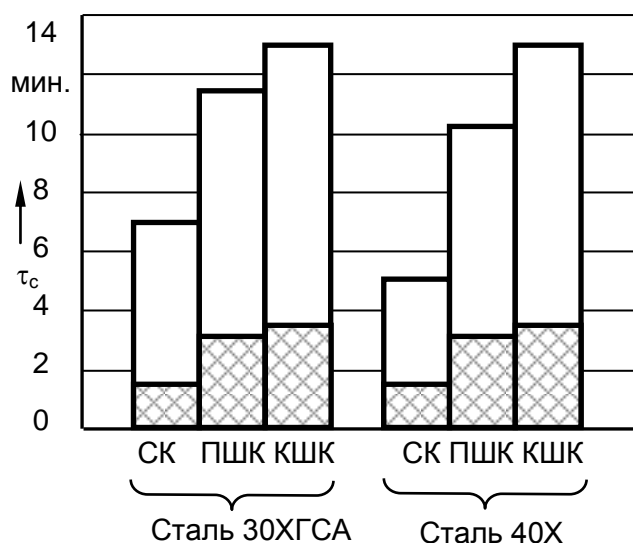


Рис. 4. Периоды стойкости τ_c испытанных шлифовальных кругов 5–60×40×20 24А25НСМ17Б на операции внутреннего шлифования: $z_n=6$; ТСМ – графит (75%) и технический воск (25%) по массе; СОЖ – 0,5%-ный водный раствор кальцинированной соды; $V_k=35$ м/с, $V_3=35$ м/мин, $S_e=0,005$ мм/дв.х,
 – $S_n=0,5$ м/мин,
 – $S_n=2,0$ м/мин

Периоды стойкости чашечных конических КШК и СК 11–125×45×32 92A25ПСМ16К6 сопоставили при плоском шлифовании торцом круга, моделирующем заточку инструмента из сталей ХВГ, HRC 54...56, и P6M5, HRC 63...65, на плоскошлифовальном станке мод. 3Д710В-1. Радиальные прорезы КШК заполняли ТСМ, состоящим из графита ГЛ1, пульвербакелита и декстрина (соответственно 70, 25 и 5% по массе). Шлифование выполняли всухую – без применения СОЖ. В ходе исследований варьировали врезной подачей шлифовального круга S_{ep} в диапазоне от 0,01 до 0,05 мм, числом радиальных прорезей z_n от 3 до 8, продольной подачей S_n от 2 до 10 м/мин, длиной радиальных прорезей L_n^{\min} от 7 до 18 мм. По результатам полного факторного эксперимента 2^4 получены регрессионные зависимости для расчета стойкости КШК и СК, представленные в табл. 2. Расчеты по этим зависимостям позволили оценить влияние условий шлифования на стойкость КШК. В качестве примера на рис. 5 приведены графические зависимости стойкости от врезной подачи. Отмечено, что во всем диапазоне изменения врезной подачи S_{ep} при шлифовании заготовок из сталей ХВГ и P6M5 композиционный круг имел больший период стойкости, чем стандартный круг. Повышение стойкости КШК при шлифовании заготовок из стали ХВГ было довольно существенным и достигало (160-350)%.

Таблица 2

Регрессионные зависимости для расчета периода стойкости τ_c чашечных конических шлифовальных кругов 11–125×45×32 92A25ПСМ16К6 при заточке режущего инструмента из сталей ХВГ и P6M5

Материал заготовки	Круг	Уравнение регрессии
Сталь ХВГ	СК	$\tau_c = 12,88 - 0,31 \cdot S_n - 237,5 \cdot S_{ep} + 6,25 \cdot S_n \cdot S_{ep}$
	КШК	$\tau_c = 5,54 - 0,61 \cdot S_n - 182,5 \cdot S_{ep} + 0,09 \cdot L_n^{\min} + 2,15 \cdot z_n +$ $+ 13,75 \cdot S_n \cdot S_{ep} + 0,10 \cdot S_n \cdot z_n - 10 \cdot S_{ep} \cdot z_n - 2,5 \cdot S_n \cdot S_{ep} \cdot z_n$
Сталь P6M5	СК	$\tau_c = 7,56 - 0,16 \cdot S_n - 131,25 \cdot S_{ep} + 3,13 \cdot S_n \cdot S_{ep}$
	КШК	$\tau_c = 4,65 - 0,16 \cdot S_n - 105,8 \cdot S_{ep} + 0,07 \cdot L_n^{\min} + 0,7 \cdot z_n +$ $+ 3,13 \cdot S_n \cdot S_{ep} - 3,64 \cdot S_{ep} \cdot L_n^{\min} - 3,18 \cdot S_{ep} \cdot z_n +$ $+ 0,01 \cdot L_n^{\min} \cdot z_n + 0,46 \cdot S_{ep} \cdot L_n^{\min} \cdot z_n$

При шлифовании заготовок из стали P6M5 прирост τ_c КШК по сравнению с СК составил (80-400)%. С увеличением врезной подачи S_{ep} прирост стойкости КШК по сравнению с τ_c СК увеличивался, что подтверждает наше предположение о том, что наиболее целесообразно КШК применять при напряженных режимах обработки заготовок, прежде всего из труднообрабатываемых материалов.

В табл. 3 приведены данные по наработке (периоде стойкости) КШК при шлифовании заготовок из сталей ХВГ и P6M5 на различных врезных подачах. Видно, что наработка КШК наиболее интенсивно растет при увеличении параметра v с 0,1 до 0,3. При дальнейшем увеличении v наработка КШК практически не увеличивается. Следует также отметить, что при одном и том же значении параметра v стойкость КШК зависит от отношения длины прорезы L_n^{\min} к числу прорезей z_n . При уменьшении длины L_n^{\min} и увеличении числа z_n прорезей наработка КШК растет. Эта закономерность имеет место при любом значении параметра v . Очевидно, при проектировании КШК с радиальными прорезями, необходимо выбирать параметр v из диапазона 0,2-0,4, обеспечивая, по возможности, минимальную величину отношения длины L_n^{\min} и числа прорезей.

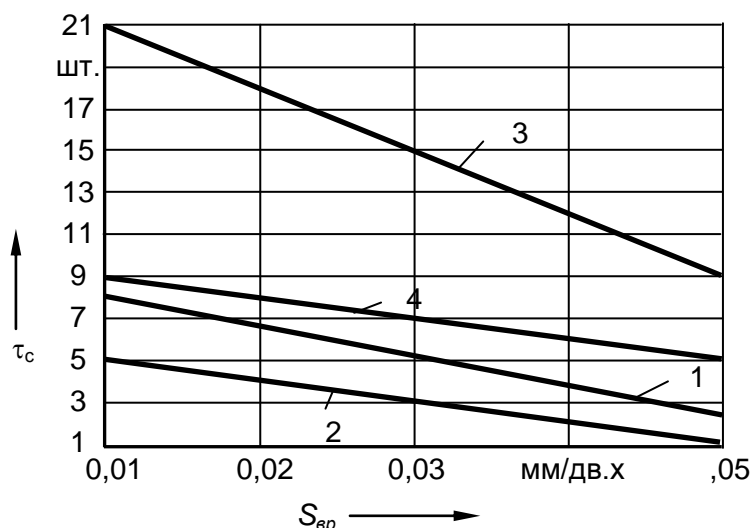


Рис. 5. Зависимость периода стойкости τ_c испытанных шлифовальных кругов 11–125×45×32 92A25ПСМ16К6 от врезной подачи S_{ep} и материала шлифуемой заготовки на операции плоского шлифования торцом круга: 1, 2 – СК; 3, 4 – КШК ($z_n=8$, $L_n^{min}=10$ мм); 1, 3 и 2, 4 – материал заготовки соответственно сталь ХВГ и сталь Р6М5; ТСМ – графит, пульвербакелит и декстрин (соответственно 70, 25 и 5% по массе); $V_k=35$ м/с; $S_n=6$ м/мин

Таблица 3

Зависимость наработки τ_n чашечных КШК 11–125×45×32 92A25ПСМ16К6 от числа и длины радиальных прорезей при шлифовании заготовок из сталей ХВГ и Р6М5: $S_n=7$ м/мин

Параметр v	Число прорезей z_n	Длина прорези L_n^{min} , мм	Материал заготовки			
			Сталь ХВГ		Сталь Р6М5	
			Врезная подача S_{ep} , мм/дв.х			
			0,01	0,03	0,01	0,03
			Наработка круга τ_n , шт			
0,10	3	10,4	9	5	5	3
	4	7,7	11	7	6	4
0,20	4	14,5	12	8	7	4
	5	11,5	14	10	7	5
	6	9,4	16	11	8	6
	7	8,0	19	13	8	6
	8	7,0	21	14	9	7
0,30	5	16,3	14	10	8	6
	6	13,4	17	12	8	6
	7	11,4	19	14	9	7
	8	10,0	22	15	10	8
0,40	6	16,8	17	12	9	7
	7	14,2	20	14	10	8
	8	12,3	22	16	10	8
0,50	7	16,8	20	14	10	8
	8	14,5	22	16	10	9
0,55	7	17,8	20	14	10	8
	8	15,4	22	16	11	9
0,60	8	16,4	22	16	11	9
0,65	8	17,2	22	16	11	9

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что композиционные круги во всех случаях имеют больший период стойкости τ_c , чем стандартные круги, что свидетельствует о менее интенсивном затуплении КШК и более длительном сохранении ими режущей способности, что можно объяснить проявлением эффекта периодического прерывания процесса шлифования и эффективным режущим, смазочным и диспергирующим действиями ТСМ. Период стойкости КШК растет с увеличением параметра ν до 0,3-0,4.

Веткасов Николай Иванович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Ульяновского государственного технического университета

УДК 658.52.011.56.012

М.В. Виноградов

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ
НА ПРЕЦИЗИОННЫХ ТОКАРНЫХ МОДУЛЯХ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРИВОДОВ ПОДАЧИ С ФРИКЦИОННЫМИ ПЕРЕДАЧАМИ**

Для выполнения высокоточной обработки на прецизионных станках целесообразным является применение в приводах подачи фрикционных передач, которые при определенных условиях способствуют реализации технических характеристик приводов, недостижимых при использовании других типов механических передач. Масляная среда, как показали исследования, значительно снижает износ поверхностей фрикционных пар и способствует эффективному удалению продуктов износа с поверхностей роликов и штока, что значительно повышает ее долговечность.

M.V. Vinogradov

**MAINTENANCE OF ACCURACY OF PROCESSING
ON PRECISION TURNING MODULES AT THE EXPENSE OF APPLICATION
OF DRIVES OF SUBMISSION WITH FRICTIONAL TRANSFERS**

For performance of precision processing on precision machines the most expedient is the application in drives of submission of frictional transfers which at certain characteristics promote realization of technical characteristics of drives unattainable at use of other types of mechanical transfers. Oil environment, as researches have shown, considerably reduces the deterioration of surfaces of frictional pairs and promotes effective removal of products of deterioration from surfaces of rollers and rod, that considerably raises its durability.

Качество привода подачи во многом определяет качество обработанных поверхностей. Оценка качества привода на стадии проектирования и отладки позволяет выявить его слабые стороны и учесть их возможное влияние на процесс обработки.

Значительную роль в формировании показателей точности деталей при прецизионной токарной обработке играют как точность позиционирования рабочего органа, непосредственно определяющего размер детали, так и колебания в системе «резец – деталь», влияющие на микрогеометрические параметры обработанной поверхности [1]. Существенное значение в этом случае приобретают характеристики привода подачи, влияющие в той или иной степени на оба указанных фактора.

Результаты исследований показали, что для выполнения высокоточной обработки на прецизионных станках целесообразным является применение в приводах подачи фрикционных передач (с цилиндрическими роликами), которые при определенных условиях способствуют реализации технических характеристик приводов, недостижимых при использовании других типов механических передач [2, 5]. Известно, что механические передачи должны обеспечивать максимальную кинематическую точность и высокую равномерность перемещения, практически не иметь нелинейностей (зазоров), обладать низким уровнем виброакустических (ВА) колебаний, минимальным собственным моментом сухого трения и высоким КПД, иметь высокую долговечность, минимальные габариты и вес и приемлемую технологичность конструкции.

К достоинствам фрикционных передач (ФП) можно отнести простоту и технологичность конструкции, равномерность передачи движения, бесшумность, относительную дешевизну, к недостаткам – необходимость прижатия роликов с усилиями, создающими повышенные нагрузки на опоры, непостоянство передаточного отношения при изменении нагрузки (из-за проскальзывания), повышенное изнашивание рабочих поверхностей роликов, в том числе из-за пробуксовывания. В исследованиях ряда авторов анализировались в подавляющем большинстве случаев только одноступенчатые ФП (приборные) или вариаторы. Однако в них не рассматривались конструкции многоступенчатых фрикционных передач (МФП), объединяющих в себе функции редуктора и тягового механизма привода подачи металлорежущего станка, и, соответственно, отсутствует анализ взаимодействия элементов в таких ФП.

Опыт эксплуатации приводов с МФП, разработанных в ПО «Гантал» (рис. 1), на прецизионных токарных модулях типа ТПАРМ [2, 3] показал, что при их рациональной компоновке обеспечивается значительное упрощение кинематических цепей, высокий КПД, низкий уровень ВА колебаний, возможность реализации режима стружкодробления (например, при предварительных проходах) путем наложения возвратно-поступательных перемещений на формообразующие движения суппорта. Однако в процессе эксплуатации приводов с МФП был выявлен ряд факторов, которые приводили к снижению их параметрической надежности. Теоретические исследования и практический опыт обусловили необходимость системного подхода к анализу параметрической надежности не только привода подачи в целом, но и собственно МФП, что позволило, в соответствии с концептуальными положениями связать на междисциплинарном уровне физические процессы в контактах фрикционных пар, вопросы долговечности МФП, особенности силового взаимодействия роликов, динамические и точностные характеристики привода, а также вопросы его настройки, диагностирования и обслуживания.

Важнейшими показателями ФП являются передаваемый момент, КПД, реализуемое передаточное отношение, причем известно, что ФП имеют меньшую нагрузочную способность по сравнению с зубчатыми и винтовыми передачами. Основная зависимость, определяющая работоспособность ФП, имеет вид

$$P_n k_{mp} = \beta_c F_\tau, \quad (1)$$

где P_n – сила прижатия роликов; k_{mp} – коэффициент трения; β_c – запас сцепления (для силовых передач $\beta_c=1.2\dots2.0$, для приборных $\beta_c=2.0\dots3.0$); F_τ – передаваемая окружная сила. Из формулы (1) следует, что сила P_n значительно превышает F_τ .

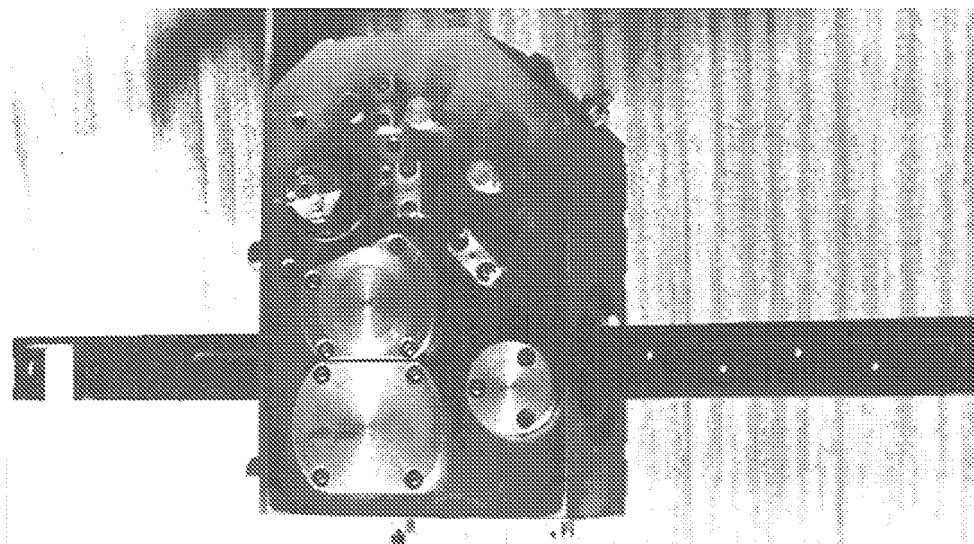


Рис. 1. Многоступенчатая фрикционная передача (МФП)

Материалы элементов ФП должны обладать возможно более высоким k_{mp} , достаточно высоким модулем упругости и низким коэффициентом внутреннего трения (в противном случае увеличиваются скольжение и гистерезисные потери на деформацию при перекатывании роликов), высокой контактной выносливостью, повышенной стойкостью к износу при скольжении, хорошей теплопроводностью. В связи с этим для роликов ФП используются закаленные стали твердостью HRC 60 (шероховатость поверхности $Ra=0,32\dots 1,25$ мкм), например, ШХ-4, ШХ-15, 18ХГТ, 18ХВН, 65Г и другие [4].

Характер изменения величины k_{mp} следует рассматривать с привлечением основных понятий триботехники, которые предполагают необходимость анализа механики контакта (макрогеометрия, механические свойства тел, вид деформаций, контактные силы, тип и скорость относительного движения, микрогеометрия поверхности, физико-химические процессы в контакте, учет влияния смазки и загрязнения, образование и разрушение окислов, адгезионных связей и т.д.). Так, например, коэффициент трения мало меняется с изменением контактных напряжений, но достаточно сильно при изменении состояния поверхности. Поверхность с высокой или низкой исходной шероховатостью в процессе приработки соответственно, сглаживается или загрубляется и приобретает так называемую эксплуатационную равновесную шероховатость, устойчиво сохраняющуюся на протяжении остального периода работы, вплоть до начала необратимых разрушений. Наиболее достоверными могут считаться те значения k_{mp} , которые получены из испытаний самой ФП в условиях ее эксплуатации.

Исследования показали, что периодические структурные преобразования поверхностных слоев взаимодействующих роликов в процессе работы, наряду с попаданием на них пыли, влаги, масла и т.п., вызывают колебания значений k_{mp} . При этом меняются не только тяговые свойства МФП, но и параметрическая надежность привода подачи.

Поверхностные слои изменяются, в основном, под воздействием переменных деформаций в зоне контакта, а также в результате физического и химического взаимодействия с окружающей средой: локальных температурных скачков, окисления, образования и разрушения адгезионных связей, фреттинг-коррозии и других явлений. Исследования, проведенные в СГТУ, показали наличие в корпусе МФП продуктов износа фрикционных пар, а рентгеноструктурный анализ выявил присутствие в них оксидов железа, Fe_2O_3 и Fe_3O_4). Указанное изменяет структуру поверхностного слоя, вносит нестабильность в процесс трения на микроуровне и приводит к стохастическому изменению коэффициента трения.

Попадание на поверхность контактирующих пар влаги, органических веществ и продуктов износа в ряде случаев существенно изменяет величину k_{mp} . Табличные значения k_{mp} для пары «сталь-сталь» со смазкой составляют 0,05, а без смазки – 0,15. Согласно экспериментальным исследованиям величины k_{mp} на МФП модуля ТПАРМ-100, при наличии на поверхности роликов продуктов износа, масляной пленки и т.д. значения k_{mp} менялись от 0,12 до 0,2 для пары «ролик-ролик» и от 0,21 до 0,41 для пары «ролик-шток», что свидетельствует об отличии реальных величин коэффициентов трения в МФП от табличных, которых можно добиться только в лабораторных условиях при идеально чистых и тщательно обезжиренных поверхностях пар трения. Проведенный сопоставительный анализ параметров МФП при работе без смазки и со смазкой (масло «Индустриальное-20») показал, что масляная среда, во-первых, обеспечивает защитные свойства против фрикционного окисления, на что указывалось ранее для одноступенчатых ФП, во-вторых, не ухудшает тяговых свойств МФП, а наоборот, стабилизирует их за счет удаления продуктов износа из зоны контакта. Это позволило разработать конструкцию и рекомендовать к внедрению МФП с масляной средой [5].

Оптимизация силовых взаимодействий элементов МФП. МФП, в отличие от одноступенчатых, обладают некоторыми особенностями, обусловленными процессом передачи касательной силы F_τ через несколько контактирующих пар роликов. Учитывая это, можно выбрать как рациональную схему компоновки МФП на стадии проектирования, так и целесообразную методику настройки в процессе изготовления и эксплуатации. Известно, что ФП может передать в точке контакта двух роликов силу

$$F_\tau \leq N_k k_{mp}, \quad (2)$$

где N_k – нормальная сила в точке контакта.

В простейшем случае двух роликов сила N_k равна силе прижима P_n , обеспечиваемой устройством натяга. В МФП, когда оси роликов и линии контакта расположены не на одной прямой, действующая в данной точке касательная сила F_τ , зависящая в основном от момента нагрузки, влияет на нормальные силы в соседних точках контакта. Указанное подробно исследовано на примере двухступенчатой ФП привода модуля ТПАРМ-100, состоящей из двух фрикционных пар «ролик-ролик» и одной фрикционной пары «ролик-шток» [6]. Подвижный ролик имеет возможность самоустанавливаться и прижимается к жестко установленным роликам силами P_{n1} и P_{n2} , направленными по линии центров соответствующих роликов и действующими на ось подвижного ролика (рис. 2).

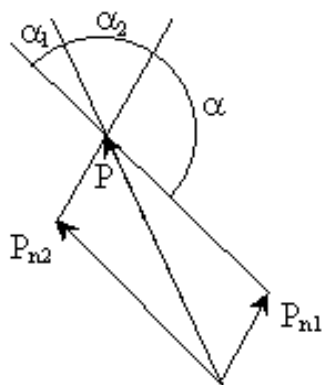


Рис.2. Схема оптимального распределения сил в двухступенчатой фрикционной передаче

Обозначив угол между P_{n1} и P_{n2} через α , условие статического равновесия ролика O_2 в векторной форме можно записать в виде [6]

$$\begin{cases} N_{k2} - P_{n2} + F_{\tau1} \sin \alpha - (N_{k1} - P_{n1}) \cos \alpha = 0; \\ N_{k1} - P_{n1} + F_{\tau2} \sin \alpha - (N_{k2} - P_{n2}) \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Возникающие в процессе передачи крутящего момента касательные силы оказывают влияние на величину нормальных сил при постоянных силах P_{n1} и P_{n2} . Кроме того, из анализа выражения установлено, что для каждого из значений соотношения касательных сил $F_{\tau1}$ и $F_{\tau2}$, существует оптимальное значение угла α , при котором это взаимовлияние сил минимально [6].

$$\alpha_{\min} = \arccos(-\chi_2), \quad (4)$$

которое для значения $\chi_2=0,28$, полученного для МФП модуля ТПАРМ-100, равно $\alpha_{\min}=106^\circ$.

Кроме того, технически трудно реализовать направление каждой из сил P_{n1} и P_{n2} точно в центр соответствующего ролика. При этом возникают дополнительные силы, увеличивающие или уменьшающие действие соответствующих сил прижатия. Очевидно, что влияние силы прижима P_{n2} на условие работы первой фрикционной пары будет наиболее ощутимо. Можно задать допуск на отклонение угла направления силы прижима P_{n2} таким образом, чтобы возникающая составляющая складывалась с силой прижима P_{n1} . Аналогичным требованиям должен отвечать допуск на отклонение угла направления силы прижима P_{n1} . Эти требования легко выполнить, если заменить силы P_{n1} и P_{n2} равнодействующей силой P , направление и величину которой можно определить из соотношения (рис. 2)

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{P_{n1}}{P_{n2}} . \quad (5)$$

Из векторной диаграммы видно, что

$$\alpha_2 = 180^\circ - \alpha - \alpha_1 . \quad (6)$$

Тогда, после подстановки получаем

$$\alpha_1 = \frac{(180^\circ - \alpha) \cdot P_{n1}}{P_{n1} + P_{n2}} . \quad (7)$$

Из соответствующего треугольника определяется величина силы прижима

$$P = \sqrt{P_{n1}^2 + P_{n2}^2 - 2 P_{n1} \cdot P_{n2} \cdot \cos \alpha} . \quad (8)$$

В процессе эксплуатации МФП взаимовлияние фрикционных пар проявляется в несимметрии привода подачи, выражающейся в различии максимальных сил F_{\max} , развиваемых приводом при движении суппорта в различных направлениях, что влияет как на динамические свойства привода, так и на его параметрическую надежность в целом. Экспериментальные исследования показали, что относительное изменение F_{\max} при реверсировании привода составило около 40%. Упомянутая сила может быть использована для оценки технического состояния МФП и диагностирования привода подачи, так как определяется регулируемой сил в отдельных фрикционных парах.

Рассмотренное взаимовлияние сил в МФП учтено при разработке методики ее настройки в процессе изготовления и при проведении технического обслуживания. Это обеспечило рациональное распределение сил в фрикционных парах и минимизацию их силового взаимовлияния при передаче момента, что способствовало повышению кинематической точности и долговечности МФП.

При прижатии взаимодействующих элементов ФП с силой P_n происходят их упругие деформации, в результате чего вместо линии касания образуется площадка (полоска) касания. Ширина площадки касания для пары «ролик-ролик» равна [7]

$$b = \sqrt{\frac{4 \Theta P_n r_1 r_2}{\pi (r_1 + r_2) \ell}} , \quad (9)$$

а для пары «ролик-шток» –

$$b = \sqrt{\frac{4 \Theta P_n r}{\pi \ell}} , \quad (10)$$

где r_i – радиус роликов; ℓ – длина полоски касания, $\Theta = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2$; μ_i – коэффициенты Пуассона ($\mu=0,3$ для стали); E_i – модули упругости ($E=2,1 \cdot 10^5$ МПа для стали).

При больших силах прижатия на площадке касания возникают значительные контактные напряжения, носящие переменный характер, которые при многократном приложении вызывают, как указывалось выше, усталостное разрушение рабочей поверхности. Для расчета максимальной величины контактного напряжения сжатия используется формула Герца-Беляева:

$$\sigma_{сж\ max} = 0,418 \sqrt{\frac{P_n E}{b\rho}} \leq \sigma_{сж\ доп} , \quad (11)$$

где $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$ – приведенный модуль упругости; $\rho = r_1r_2/(r_1 + r_2)$ – приведенный радиус кривизны; $\sigma_{сж\ доп}$ – допускаемое контактное напряжение сжатия (для закаленной стали $\sigma_{сж\ доп} = 800$ МН/м²). Формулы (9)-(11) применены в разработанной в СГТУ методике расчета долговечности МФП, проведенной по аналогии с расчетом долговечности подшипников качения, характер взаимодействия элементов которых во многом идентичен характеру взаимодействия фрикционных пар исследуемой передачи. Полученные результаты в основном соответствуют практическим данным.

При небольших силах прижатия под воздействием нагрузки на ФП возможно пробуксовывание роликов, что приводит к интенсивному локальному износу рабочей поверхности и изменению ее геометрии (появлению лунок или лысок). Последнее вызывает появление ударных нагрузок, что обуславливает возрастание вибраций, увеличение потерь в ФП и неравномерность изнашивания рабочих поверхностей. Так, например, экспериментально-аналитическое исследование влияния износа поверхности фрикционных пар на характеристики перемещения штока МФП показало, что неравномерность скорости перемещения штока определяется геометрическими параметрами локальных дефектов поверхности и силами прижатия фрикционных пар [6]. Из этого следует, что для каждой взаимодействующей фрикционной пары должны быть рассчитаны оптимальные силы прижатия, обеспечивающие максимальную долговечность и параметрическую надежность МФП. Необходимо отметить, что наиболее целесообразным является автоматизирование расчета МФП, что позволит осуществить в диалоговом режиме выбор ее приемлемых параметров.

Используемые на модулях типа ТПАРМ в приводах подачи МФП имеют ограничения по величине развиваемой силы на штоке, причем верхний предел связан с величиной контактного напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ в наиболее нагруженной фрикционной паре, а нижний предел – с пробуксовкой роликов в случае, когда сила резания становится сравнимой с величиной F_{max} . В первом случае снижается долговечность МФП, а во втором – резко снижается параметрическая надежность привода подачи и модуля в целом. Это обусловило целесообразность контроля величины F_{max} как интегрального диагностического параметра, определяющего работоспособность МФП. Разработанное динамометрическое устройство (ДУ) позволило как в процессе настройки МФП, так и в процессе ее эксплуатации оперативно определять усилие F_{max} , развиваемое приводом, что способствовало повышению эксплуатационной надежности приводов подачи [8].

Упомянутое ДУ позволяет фиксировать силу сжатия до 1000 Н с погрешностью не более 25 Н. В процессе измерения ДУ размещалось между элементами станины и кареток суппорта модуля. Перемещение кареток осуществлялось в ручном режиме со скоростью 3...5 мм/с по координатам X и Z до остановки суппорта в результате проскальзывания МФП. В этот момент фиксировалась величина F_{max} . В условиях эксплуатации контроль усилия F_{max} был выполнен на 38 модулях ТПАРМ-100 и 2 модулях ТПАРМ-100М (экспериментальная лаборатория). Обобщенные результаты измерений (см. таблицу) свидетельствуют о том, что после внедрения ДУ в 2,5 раза уменьшилось количество приводов с $F_{max} < 400$ Н (это усилие является номинальным), что обеспечило значительное снижение числа отказов модуля из-за нарушения работоспособности МФП. Кроме того, на ряде модулей МФП были настроены на

усилие $F_{\max} > 600$ Н, что позволило проводить на них обработку с достаточно большими силами резания.

Результаты измерений усилия на штоке МФП приводов подачи модулей ТПАРМ в условиях эксплуатации до и после внедрения динамометрического устройства

Сила на штоке	Количество приводов	
	До внедрения ДУ	После внедрения ДУ
<400 Н	25%	10%
400 Н – 600 Н	75%	56%
>600 Н	–	34%

В результате испытаний установлена целесообразность применения ДУ для оперативной оценки величины F_{\max} в условиях эксплуатации. Выявлена необходимость введения параметра «сила, развиваемая приводом подачи» в перечень показателей, включенных в ТУ на модуль типа ТПАРМ, а также в приемо-сдаточные акты, составляемые после проведения мероприятий в рамках СТО и ПР.

Коэффициент полезного действия МФП выше, чем для других типов механических передач. При оценке КПД η фрикционной передачи в общем случае учитываются потери на геометрическое скольжение N_{zc} , упругое скольжение N_{yc} , трение в подшипниках $N_{ни}$, сопротивление катков $N_{кт}$:

$$\eta = N_{пол} / (N_{пол} + N_{ном}), \quad (12)$$

где $N_{пол}$ – полезная мощность; $N_{ном}$ – потери мощности, $N_{ном} = N_{zc} + N_{yc} + N_{ни} + N_{кт}$. Так как у МФП с металлическими колесами упругое скольжение практически отсутствует, а геометрическое скольжение не допускается, то $N_{ном} = N_{ни} + N_{кт}$. В этом случае для рациональной конструкции, при высокой точности изготовления и тщательной настройке МФП ее КПД достигает величины 0,95...0,97, что превосходит КПД лучших шариковых винтовых передач (ШВП) (не более 0,8...0,9) [3].

При анализе ФП удобно использовать понятие «относительное скольжение», характеризующее разницу длины пути, проходимого роликом при перекачивании по плоскости за один оборот и длиной его окружности. В приложении к МФП указанное понятие в известной литературе практически не рассматривалось, что потребовало проведения соответствующих исследований.

Качение роликов передач, применяемых в модулях типа ТПАРМ, характеризуется одинаковыми упругими константами материалов роликов и штока, и при условии принятия эллиптического закона распределения давлений и постоянства коэффициента трения, можно допустить наличие в зоне контакта трех участков: двух участков скольжения по краям, и расположенного между ними участка сцепления. При реальных значениях k_{mp} и соотношениях геометрических параметров роликов передний участок скольжения исчезает, и зона контакта делится на участок скольжения и участок сцепления, начинающийся у входа в контакт. В частном случае, когда в контакте реализуется максимальная касательная сила, вся зона контакта охвачена скольжением.

При взаимодействии стальных цилиндрических роликов их деформации малы, следовательно, ширина полоски контакта весьма мала по сравнению с радиусами, материалы тел претерпевают плоскую деформацию и подчиняются закону Гука. Приведенные в работе [3] экспериментальные и теоретические тяговые характеристики фрикционных пар «сталь-сталь» (ШХ15) с $R_1 = R_2 = 25$ мм, HRC 60...62, подтверждают наличие зависимости ξ_c от пере-

даваемого момента (при постоянной силе прижатия), обнаруживая определенные расхождения экспериментальных и теоретических значений. В работе делается попытка объяснить эти расхождения повышенной тангенциальной податливостью микронеровностей рабочих поверхностей роликов. Кроме того, сказываются погрешности измерения скоростей роликов ввиду малости ξ_c при стальных роликах и возможный перекося их осей.

При использовании ФП в замкнутом приводе подачи модуля типа ТПАРМ величина ξ_c , на первый взгляд, существенного значения не имеет, однако в динамическом режиме: при разгоне, торможения, реверсе, при работе привода со стружкодроблением она в значительной степени влияет на динамические свойства привода подачи. Реально это приводит к отказам, т.е. аварийным остановкам модуля из-за срабатывания блокировки «несовпадение координат», искажению формы при обработке сложных поверхностей, отсутствию стружкодробления и т.п. Очевидно, что величина ξ_c является важной характеристикой МФП, позволяющей объективно оценить ее потребительские свойства с учетом различных факторов, которые трудно определить в явном виде (например, перекося осей).

Сложности в измерении скоростей роликов из-за высоких требований к точности измерений (ввиду малых значений ξ_c) дали основание разработать оригинальную методику оценки величины скольжения МФП модуля типа ТПАРМ, учитывающую ее особенности [3]. Наличие сравнительно короткого поступательно движущегося конечного звена (штока) не позволяет проводить измерения при его перемещении в одну сторону с достаточной точностью ввиду малых значений ξ_c . В то же время реверсивная работа привода с односторонней нагрузкой соответствует реальным условиям эксплуатации и позволяет, ввиду значительной абсолютной величины скольжения при большом числе двойных ходов, измерить ее с достаточной точностью.

Из схемы испытательного стенда (рис. 3) видно, что при наличии односторонней нагрузки на шток в виде груза, подвешенного через блок, скорость штока будет отличаться от расчетной или от скорости холостого хода: при опускании груза она будет больше, а при подъеме – меньше на величину, определяемую скольжением. Суммарный угол поворота входного ролика будет в первом случае меньше, а во втором – больше, чем в случае холостого хода, т.е. когда скольжение можно принять равным нулю. Обеспечив достаточно точную фиксацию штока в момент измерения, относительное скольжение можно определить по формуле

$$\xi_c = (\alpha_{xx} - \alpha_n) / \alpha_{xx}, \quad (13)$$

где α_{xx} , α_n – суммарный угол поворота входного ролика без нагрузки и с нагрузкой, соответственно. После выполнения МФП определенного числа двойных ходов шток медленно подводится к индикатору, и фиксируется его положение.

Для определения величины абсолютного скольжения удобно использовать величину $\Delta\xi = \alpha_{xx} - \alpha_n$, подсчитанную за определенное число двойных ходов, которая измеряется с помощью указателя, закрепленного на валу входного ролика, и шкалы на корпусе МФП. Она равна разности между положением указателя в начале эксперимента и после выполнения определенного числа двойных ходов.

Угол α_{xx} определялся путем подсчета числа оборотов входного ролика при отсутствии нагрузки по формуле

$$\alpha_{xx} = 2 (N_1 + k_{\partial x} N_2) 360^\circ, \quad (14)$$

где N_1 – число оборотов, необходимое для перемещения штока от индикатора до конечного выключателя S_1 ; N_2 – число оборотов, необходимое для перемещения штока от S_1 до S_2 ; $k_{\partial x}$ – число двойных ходов.

Относительное скольжение определялось по формуле

$$\xi_c = \frac{\Delta\xi}{\alpha_{xx}}. \quad (15)$$

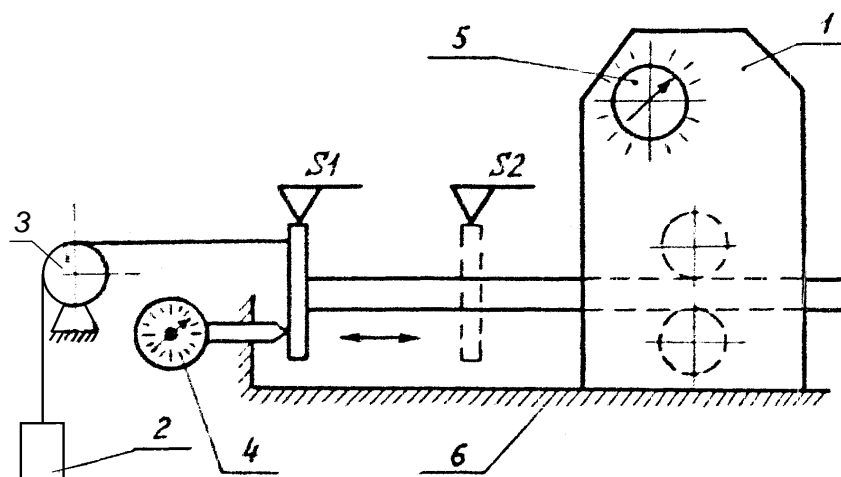


Рис. 3. Схема стенда для исследования скольжения в МФП:
 1 – многоступенчатая фрикционная передача; 2 – груз; 3 – блок;
 4 – индикатор часового типа; 5 – указатель угла поворота со шкалой;
 6 – основание; S_1 , S_2 – конечные выключатели

Каждое измерение повторялось не менее трех раз; определялось среднее арифметическое результатов измерений, которое затем подставлялось в формулу (15) для определения ξ_c .

Для измерения предельных усилий, развиваемых на штоке, использовалось упомянутое выше ДУ, которое «зажималось» между штоком и стойкой 6 в одном случае, между штоком и корпусом МФП – в другом (рис. 3). В экспериментах ФП регулировалась на три предельных усилия: 250 Н, 450 Н, 800 Н.

Рабочие возвратно-поступательные движения штока обеспечивались электродвигателем постоянного тока, питаемым от стабилизируемого регулируемого источника постоянного тока Б5-7. Реверс осуществлялся путем изменения полярности подаваемого на двигатель напряжения посредством конечных выключателей S_1 , S_2 (рис. 3) и промежуточного реле, контакты которого коммутировали цепь питания электродвигателя.

Для первой серии экспериментальных исследований МФП был взят трехступенчатый фрикционный редуктор модуля ТПАРМ-100, обеспечивающий перемещение штока 0,6 мм на один оборот входного вала ($i=1/100$), настроенный по заводской методике, в рабочем состоянии, поверхности роликов не смазаны (условно сухие). Последняя фрикционная пара «ролик-шток» обеспечивала усилие (буксовала) при 450 Н.

Вращая входной вал вручную, подсчитывали угол от исходной точки до точек реверса. После подстановки получили следующее значение угла поворота входного вала за десять двойных ходов по формуле (14)

$$\alpha_{xx} = 2 (20 + 10 \cdot 8) 360^\circ = 72000^\circ .$$

После завершения измерений относительного скольжения условно сухого редуктора, через верхнее окно в корпус редуктора заливалось масло, стекавшее в подставленную под него емкость. Полив маслом периодически повторялся в процессе измерений. На рис.4 изображены зависимости относительного скольжения от нагрузки на штоке для различных сред и регулировок МФП.

Результаты измерений показали, во-первых, что величина ξ_c примерно в 2 раза превышает данные, полученные для одноступенчатой передачи. Указанное объясняется наличием в МФП нескольких фрикционных пар. Во-вторых, масляная среда практически не сказывается на величине ξ_c , что может быть объяснено исходной загрязненностью условно сухой МФП, что справедливо для условий эксплуатации токарного модуля. Характер изменения

относительного скольжения связан только с изменением регулировки МФП на различные предельные усилия на штоке (250 Н, 450 Н, 800 Н).

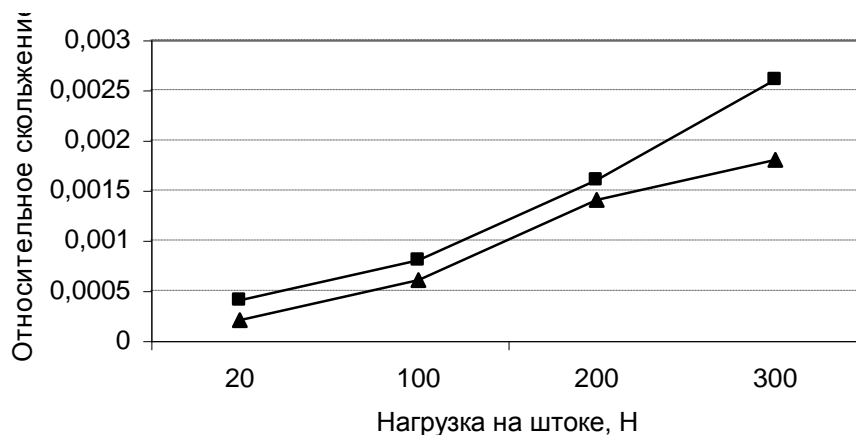


Рис. 4. Зависимость коэффициента относительного скольжения ξ от нагрузки на штоке МФП при различных рабочих средах:
□ – МФП условно сухая; △ – МФП с СМ

Масляная среда, как показали исследования, значительно снижает износ поверхностей фрикционных пар и способствует эффективному удалению продуктов износа с поверхностей роликов и штока, что, естественно, значительно повышает ее долговечность.

Анализ результатов исследований показал, что величина относительного скольжения ξ_c , наряду с предельной силой на штоке, является важным и информативным показателем технического состояния МФП, которые имеют сопоставимые величины относительного скольжения у модулей ТПАРМ-100 и ТПАРМ-80 (ξ_c не более 0,005), причем при работе в масляной среде значения ξ_c несколько меньше (до 25%), чем при работе без смазки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев В.В. Тенденции развития мирового станкостроения // СТИН. 2000. № 9. С.20-24.
2. А.с. 1144774 СССР. Токарный станок / И.Р. Зацман, Л.И. Брук, С.И. Зайцев и др. // Открытия. Изобретения. 1985. № 10. С.31.
3. Игнатъев А.А., Виноградов М.В. Параметрическая надежность приводов подачи с фрикционной передачей // СТИН. 1996. № 1. С.12-15.
4. Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач. М.: Машиностроение, 1982. 263 с.
5. Кривошеин Ю.А., Виноградов М.В. Определение информативных параметров контактирования трибосопряжений // Управляющие и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: Межвуз. науч.сб. Саратов: СГТУ, 1999. С.47-50.
6. Игнатъев А.А., Виноградов М.В., Сигитов Е.А. Обеспечение параметрической надежности приводов подачи высокоточных автоматизированных станков // Известия вузов. Машиностроение. 2003. № 10. С.63-68.
7. Пронин Б.А., Ревков Г.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи. М.: Машиностроение, 1980. 320 с.
8. Виноградов М.В. Высокоточные автоматизированные приводы подачи станков // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: Межвуз. науч.сб. Саратов: СГТУ, 2000. С.64-68.

9. Игнатъев А.А., Виноградов М.В. Параметрическая надежность приводов подачи с фрикционной передачей // СТИН. 1996. № 1. С.12-15.

Виноградов Михаил Владимирович –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»
Саратовского государственного технического университета

УДК 629.113.004

И.К. Данилов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕМОНТНЫХ ЦИКЛОВ ДВС
И ОЦЕНКА ИХ ТРУДОЕМКОСТИ СЕТЕВЫМИ МЕТОДАМИ**

Рассматривается моделирование ремонтных циклов ДВС сетевыми методами, учитывающими параллельные процессы восстановления работоспособности. Обосновывается экспоненциальный характер трудоемкости ремонтных воздействий, которая может использоваться при оценке ремонта нормо-часами.

I.K. Danilov

**ICE (INTERNAL-COMBUSTION ENGINE) SERVICE CYCLES SIMULATION
AND THEIR WORKING HOURS EVALUATION BY NETWORK METHODS**

The article describes ICE service cycles simulation by network methods, which also take into consideration efficacy renewal. It is reasoned that the exponential character of working hours can be used while evaluating service by standard hours.

Восстановление работоспособности ДВС (как системы) можно считать параллельным процессом, так как оно связано с ремонтом ЦПП, КШМ, системы питания, смазки (компонентов).

Взаимодействие компонентов системы во времени можно описывать в непрерывном времени – дифференциальными уравнениями, в дискретном – уравнениями в конечных разностях и нерегулярном (событийном) времени, когда время отсчитывается лишь в моменты, происхождения событий, изменяющих состояние. Последний способ характерен для процесса восстановления работоспособности ДВС, наиболее экономичный, но и непростой с точки зрения аналитического описания. Наиболее мощные инструменты здесь – имитационные модели и сети Петри, как основа этих моделей.

Моделируемая система представляется совокупностью компонентов, обладающих собственными состояниями. Смена состояний может осуществляться заменой детали, регулировкой или другого внутреннего для системы фактора. Таким образом, с точки зрения взаимодействия элементов системы не все их состояния равноправны. Целесообразно выделить

среди них три класса состояния [1]: системные, сопряженные, внутренние. Состояния первого класса существенны для планирования ремонтных циклов ДВС. Это некоторая совокупность сопряженных состояний систем и механизмов ДВС, находящихся под воздействием внешних факторов – производственных условий восстановления работоспособности. Под сопряженными будем понимать смежные состояния элементов (деталей), через которые осуществляется их взаимодействие.

Изменение внутренних состояний системы или механизма ДВС отражается непосредственно на функционировании других систем, эти состояния важны лишь с точки зрения исследования их технического состояния. Исследуемая система представляет собой совокупность процессов, которая в терминах динамического моделирования может быть описана в виде последовательностей взаимодействия с элементами смежных объектов системы.

Обозначим через $S_i, i=1, \dots, r$ элементы исследуемой системы, сами являющиеся элементарными динамическими системами. Внутренние состояния систем и механизмов ДВС S_i обозначим $x_1^i, x_2^i, \dots, x_r^i$.

На рис. 1 представлено взаимодействие систем $S_1 \dots S_4$, отмеченные состояния показаны сплошными (закрашенными) кружками.

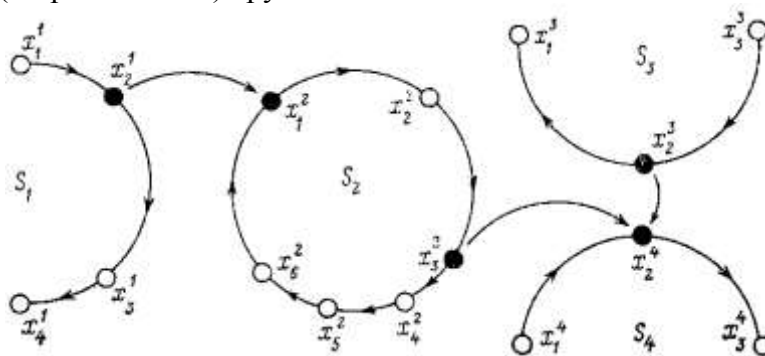


Рис. 1. Взаимодействие элементов системы через сопряженные состояния

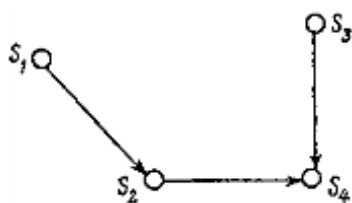


Рис. 2. Граф взаимодействующих систем

Состояние x_1^1 системы S_1 инициирует запуск системы S_2 , состояние которой x_3^2 , а также состояние x_2^3 системы S_3 инициируют запуск системы S_4 . Вся картина взаимодействия может быть представлена графом, изображенным на рис. 2.

В данном случае можно говорить о динамизации графовой статической модели системы (ДВС) через динамические системы S_i (смазки, питания, КШМ, ЦПГ). Модель приведенной системы может быть получена средствами языков программирования и обширного программного обеспечения. Кроме того, здесь важен порядок (последовательность) изменения состояния систем. Моделирование процессов можно осуществить, приписывая каждому состоянию x_k^i специальный параметр порядка, то есть рассматривая расширенное состояние $(x_k^i, v_k^i), k=1, \dots, n_i$ и упорядочивая параметры v_k^i . Пример упорядочения – предписывание порядка по v_k^i в соответствии с заданной последовательностью и системой приоритетов.

Если ввести в рассмотрение системы соотношений над множеством $\{v_k^i\}, i=1, \dots, r; k=1, \dots, n_i$, определяющие порядок осуществления событий в системе, – синхронизаторы, то мы получим еще один способ генерации состояний.

Механизм «рандеву», например, является одним из способов решения проблем взаимодействия параллельных процессов [2]. Основным его преимуществом является четкость функционирования моделируемой системы с параллельными процессами, так как синхронизация выступает условием взаимодействия. Но очень строгая синхронизация процессов требует построения дополнительных параллельных процессов.

Механизм «мониторов» состоит в том [2], что разработка модели может проводиться независимо от проектирования остальных процессов, но в нем нет механизмов синхронизации, что не является в целом принципиальным для систем, построенных из независимых процессов.

Нам представляется, что представленные типы состояний позволяют использовать различные виды моделей процессов, требующих или не требующих синхронизации.

Одним из методов моделирования, интегрирующих эти подходы, является метод, основанный на диаграммах Ганта [3]. Для проведения ремонта ДВС известна очередность операций u_i и продолжительность (трудоемкость) T_i^j каждой j -й операции на I -й единице оборудования. Совокупность векторов T_i^j на плоскости (t, i) (t – время) для фиксированного j образует диаграмму Ганта (рис. 3).

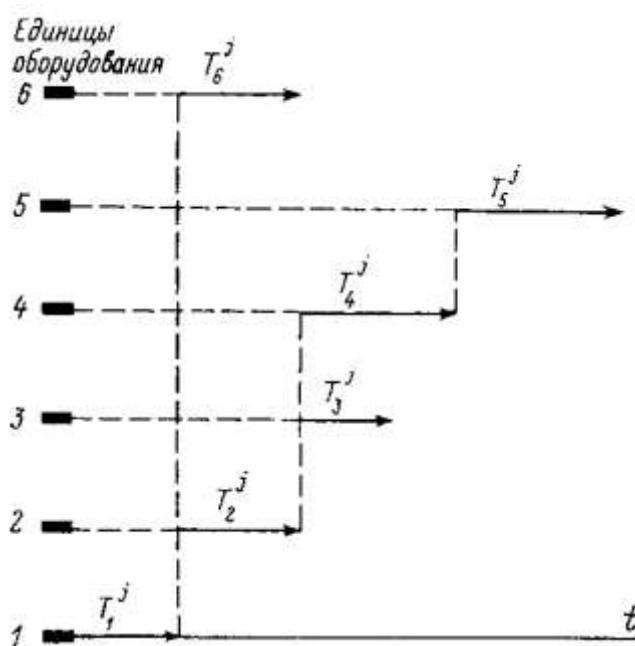


Рис. 3. Диаграмма Ганта

Диаграмма Ганта – статический портрет динамики ремонтных воздействий. Она дает наглядное представление о временных соотношениях и взаимосвязи между процессами восстановления работоспособности. Еще важнее тот факт, что пользуясь диаграммой Ганта, можно определить время простоя и время окончания (трудоемкости) цикла восстановления работоспособности каждой из систем S . Эти величины играют существенную роль при оценке организации технологических и информационных процессов, оценке трудоемкости и решении задач планирования производства.

Для систем с параллельными процессами, к числу которых можно отнести ДВС, можно воспользоваться многомерными диаграммами Ганта, представляющими собой вложенный в трехмерное евклидово пространство R^3 с осями i, j, t набор векторов T_i^j , коллинеарных оси t , определенных схемой ремонта ДВС (рис. 4).

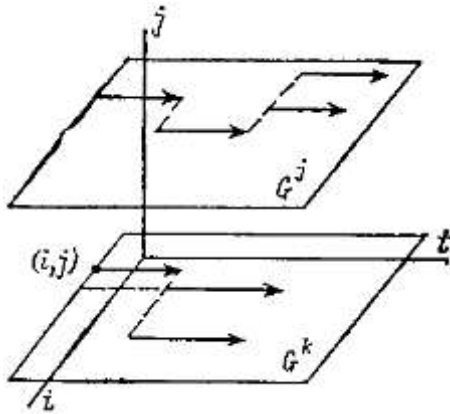


Рис. 4. Многомерная диаграмма Ганта

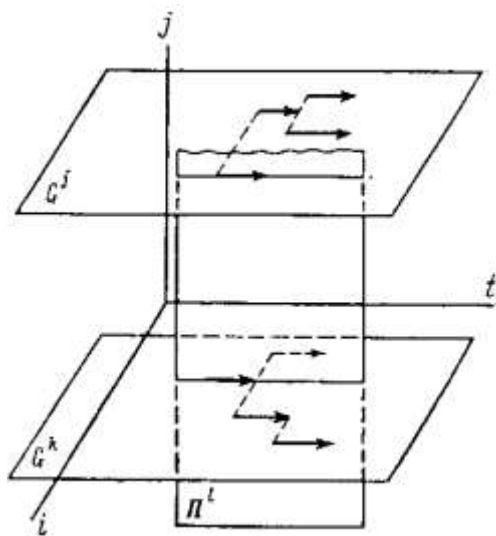


Рис. 5. Сечение многомерной диаграммы Ганта

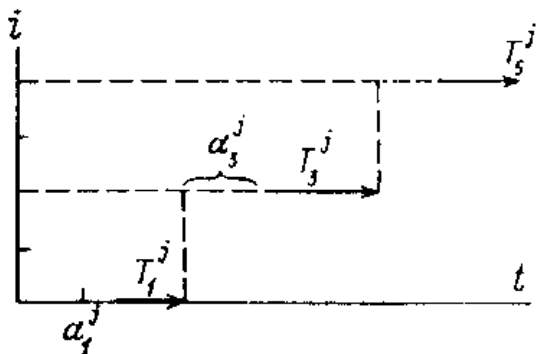


Рис. 6. Параметры простоя перед операциями восстановления некоторых сборочных единиц ДВС

Диаграмма Ганта для детали j (j -я диаграмма Ганта) лежит в плоскости, параллельной плоскости (t, i) . Сечение пространства R^3 плоскостью Π^l , проходящей через точку l на оси i и параллельной плоскости (t, j) , суть диаграммы загрузки l -й единицы оборудования (рис. 5).

Далее мы будем отождествлять проекцию многомерной диаграммы Ганта на плоскость с самой этой плоскостью. Проекции векторов T_i^j на ось t не пересекаются: на одной единице оборудования не может быть одновременно более одной сборочной единицы, одна сборочная единица не может находиться на двух различных единицах оборудования. Запишем j -ю диаграмму Ганта G^j в проекциях на ось t в виде рекурсии, вводя новые переменные y_i^j :

$$y_1^j = a_1^j + T_1^j,$$

$$y_2^j = y_1^j + a_2^j + T_2^j$$

.....

$$y_{n_j}^j = y_{n_j-1}^j + a_{n_j}^j + T_{n_j}^j$$

Здесь $a_i^j \geq 0$ – параметр, имеющий смысл времени простоя перед обработкой на i -й единице оборудования (рис. 6).

Многомерная диаграмма Ганта (МДГ) описывается в этом случае системой, где неравенство-произведение введено для реализации условия непересечения:

$$y_i^j = y_{i-1}^j + a_i^j + T_i^j,$$

$$(a_i^j - y_i^k)(a_i^k - y_i^j) \leq 0,$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, r; a_i^j \geq 0, y_0^j \equiv 0.$$

МДГ по сути является моделью, представляющей процесс функционирования ремонтных циклов ДВС. Для аналитического решения задачи оптимального планирования (в том числе, оптимальной последовательности восстановления работоспособности ДВС) задача сводится к минимизации целевой функции.

Кроме того, для аналитического описания параллельных процессов восстановления систем ДВС введем понятие дискретной диаграммы Ганта. Для этого произведем поддетальную дискретизацию времени, в котором рассматривается трудоемкость при обработке j -й

детали, полагая $t^j = 0, \Delta^j, 2\Delta^j, \dots$. Определим шаг Δ^j как наибольший общий делитель (НОД) целых чисел $T_i^j, i = 1, \dots, r_j$, где r – число единиц оборудования, на которых обрабатывается j -я деталь

$$\Delta_i^j = \text{НОД}(T_1^j, \dots, T_{r_j}^j).$$

Тогда m_i^j – время обработки j -й детали на i -й единице оборудования, выраженное в единицах

$$\bar{m}_i^j = T_i^j / \Delta^j.$$

Для связи временных шкал t^j определим шаг дискретизации Δ , общий для всех r деталей:

$$\Delta_j^j = \text{НОД}(\Delta^1, \dots, \Delta^r).$$

Соответственно $m_i^j = T_i^j / \Delta \Delta^j$ есть длительность обработки j -й детали на i -й единице оборудования, выраженная в реальном времени системы. В каждый момент времени k компонент ДВС по отношению к j -й детали находится в некотором состоянии $x^j(n)$. Это состояние для всех компонент ДВС в k -й момент времени всех единиц оборудования системы, участвующих в восстановлении ДВС:

$$x^j(n) = \{x_1^j(n), \dots, x_r^j(n)\}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Для компьютерного моделирования необходимо осуществить «развертку» во времени векторов y_i^j , используя $x_i^j(n)$ в качестве внутренних состояний системы. Используя динамические циклические модели [3] для генерации последовательности состояний представим состояние элемента системы в момент времени n в виде:

$$x_i^j(n) = \exp(\Pi n i / 2), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{где } i = \sqrt{-1}.$$

С учетом обработки на i -й единице оборудования j -й детали с помощью введенного выше числа m_i^j и времени ожидания a_i^j состояние $x_i^j(n)$ можно представить в виде:

$$x_i^j(n) = c_i^j \exp(2 \Pi i (n - a_i^j) / m_i^j) + a_i^j, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Таким образом, сетевое планирование позволяет моделировать и оптимизировать структуры ремонтных циклов, а трудоемкость должна определяться не алгебраической суммой трудоемкостей каждой из них, а несколько меньшим экспоненциальным увеличением за счет параллельности процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. М.: Наука, 1989. 133 с.
2. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 263 с.
3. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.

Данилов Игорь Кеворкович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок на транспорте» Саратовского государственного технического университета

А.В. Королев, А. А. Королев, М.К. Решетников

ИМИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБКАТКОЙ В АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

Определен съем припуска при использовании имитационной технологии абразивной обкаткой, который впервые учитывает число абразивных зерен на единице поверхности инструмента, параметры площадки контакта заготовки и инструмента, деформацию микронеровностей. Выполненные исследования выявляют механизм процесса абразивной обработки обкаткой и позволяют совершенствовать условия его осуществления.

A.V. Korolev, A.A. Korolev, M.K. Reshetnikov

PECULIARITY OF THE SIMULATION TECHNOLOGY WITH THE TREATMENT OF THE ABRASIVE MEDIUM

The removal of margin at the simulation technology with the treatment of the abrasive medium is determined; it takes into account for the first time the number of the abrasive grains on the surface of the tool, area parameters of prepared details contact and the tool, distortion of microprominence. Revealed regularities discover the mechanism of the process of the abrasive treatment and allow to improve the conditions of its performance.

Особенностью процесса обкатки в абразивной среде по сравнению с абразивной обработкой является то, что абразивные зерна под действием сил резания шаржируют в поверхность инструмента, удерживаются материалом инструмента, а их вершины царапают обрабатываемую поверхность заготовки. Глубина внедрения зерен в поверхность заготовки и число контактирующих с заготовкой зерен существенно зависит от шероховатости контактирующих поверхностей. К сожалению, это обстоятельство ранее совершенно не учитывалось.

На рис. 1 показана зона контакта поверхности заготовки с поверхностью инструмента в системе координат XOZ . За ось абсцисс OX принята средняя линия профиля инструмента, а за ось ординат OZ – нормаль к поверхности инструмента. Расстояние между средними линиями профилей заготовки и инструмента (z) характеризует степень сближения их поверхностей (ϵ). Под действием внешней нагрузки шероховатая поверхность заготовки взаимодействует с шероховатой поверхностью инструмента, в результате чего происходит упругая и пластическая деформация контактирующих микронеровностей.

На площадках контакта между микронеровностями заготовки и инструмента располагается абразивная паста (см. рис. 1). Абразивные зерна, содержащиеся в пасте, вдавливаются в поверхности заготовки и инструмента на глубину, обратно пропорциональную твердости. Часть зерен, особенно мелких, находящихся во впадинах микронеровностей инструмента, могут не касаться поверхности заготовки. Очевидно, чем больше шероховатость поверхности инструмента, тем меньшее число зерен будут контактировать с поверхностью заготовки, тем меньше будет производительность обработки.

В процессе перемещения инструмента относительно заготовки между их контактирующими поверхностями возникает микропроскальзывание. За счет этого абразивные зерна царапают поверхность заготовки и снимают припуск.

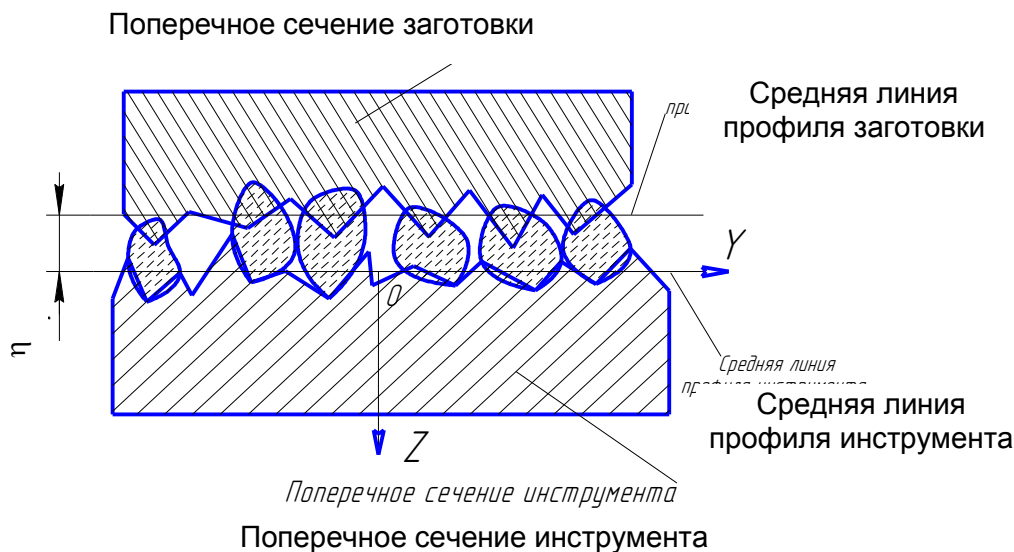


Рис. 1. Схема контакта поверхности заготовки с поверхностью доводочного инструмента

Величина снимаемого с заготовки припуска на элементарной полоске ∇x , расположенной в произвольном поперечном сечении заготовки на расстоянии x от начала координат, за время t равна:

$$q_x = \frac{\sum V_{it}}{\pi \cdot D_z \cdot \nabla x}, \quad (1)$$

где D_z – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки; $\sum V_{it}$ – объем царапин от зерен на поверхности заготовки за время t .

Объем царапин от зерен за время t определяется произведением объема царапин за один контакт с инструментальным роликом на число таких контактов за это время:

$$\sum V_{it} = i_{kt} \cdot \sum V_{i1}, \quad (2)$$

где i_{kt} – число контактов произвольной точки поверхности заготовки с инструментальными роликами за время t ; $\sum V_{i1}$ – объем срезаемых стружек с поверхности заготовки за один контакт с инструментальным роликом.

В свою очередь число контактов произвольной точки поверхности заготовки с инструментальными роликами за время t равно:

$$i_{kt} = k \cdot n_{\Delta} \cdot t, \quad (3)$$

где k – число инструментальных роликов; n_{Δ} – относительная частота вращения заготовки и центра роликов.

Объем срезаемых стружек за один контакт с инструментальным роликом определяется выражением:

$$\sum V_{i1} = 2 \cdot z_o \cdot b_x \cdot \nabla x \cdot P_k \cdot V_i, \quad (4)$$

где z_o – число абразивных зерен, находящихся на единице поверхности инструментального ролика; b_x – полуширина полоски контакта инструментального ролика с поверхностью заготовки в поперечном сечении x ; P_k – вероятность контакта зерен, находящихся на поверхности инструментального ролика на площадке контакта, с поверхностью заготовки; V_i – средний объем единичной царапины поверхности заготовки.

Подставляя выражения (2)-(4) в равенство (1), получим:

$$q_x = 2 \cdot k \cdot z_o \cdot \frac{b_x \cdot P_k \cdot V_i \cdot n_\Delta \cdot t}{\pi \cdot D_z} . \quad (5)$$

Найдем последовательно входящие в равенство (5) значения параметров. Число зерен на единице поверхности инструмента и заготовки можно найти по методике, предложенной в работе [1]. Если объемный вес материала зерен обозначить через γ_3 , то вес одного зерна будет равен:

$$\gamma_3 = 0,52 d_o^3 \gamma_3 ,$$

где d_o – средний диаметр зерен.

Пусть в единице веса пасты на вес зерен приходится ζ -я часть. Тогда в единице веса пасты будет находиться число зерен, равное:

$$z_e = \frac{\zeta}{\gamma_3} = \frac{\zeta}{0,52 d_o^3 \gamma_3} .$$

Единица веса доводочной пасты в готовом виде составляет следующий объем:

$$V_{II} = \frac{\zeta}{\gamma^3} + \frac{1-\zeta}{\zeta} .$$

где γ_{II} – средний объемный вес прочих компонентов пасты (преимущественно масла).

Тогда в единице объема пасты будет находиться число зерен $z_{об}$, равное:

$$z_{об} = \frac{z_e}{V_{II}} = \frac{1}{0,52 d_o^3 \left[1 + \frac{\gamma_3}{\gamma_{II}} \left(\frac{1-\zeta}{\zeta} \right) \right]} . \quad (6)$$

Если доводочная паста хорошо перемешана и наносится на поверхность доводочных роликов одним ровным слоем, из выражения (6) число зерен на единице поверхности доводочных роликов будет равно:

$$z_o = \sqrt[3]{z_{об}^2} = \frac{1,55}{d_o^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1-\zeta}{\zeta} \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_{II}} \right)^{\frac{2}{3}}} . \quad (7)$$

Среднее же расстояние между зернами определится из следующего выражения:

$$l_3 = \frac{1}{\sqrt[3]{z_{об}}} = 0,8 d_o \left(1 + \frac{\gamma_3}{\gamma_{II}} \cdot \frac{1-\zeta}{\zeta} \right)^{\frac{1}{3}} . \quad (8)$$

Вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки определим по форме полной вероятности:

$$P(z, d_z) = \sum_{d_z=d_{\min}}^{d_{\max}} P(d_z) \cdot P(d_z / z) , \quad (9)$$

где $P(dz)$ – вероятность того, что на поверхности инструмента в зоне контакта с заготовкой имеется зерно размером dz ; $P(dz/z)$ – вероятность того, что это зерно занимает на поверхностях инструмента такое положение, при котором оно оставит след на поверхности заготовки; z – случайная величина расстояния неровностей профилей заготовки $z1$ и инструмента $z2$ в направлении нормали их поверхностей:

$$z = z1 - z2 .$$

Так как z_1 и z_2 являются независимыми случайными величинами, то величина z является случайной функцией от этих величин. На основе закономерностей теории случайных функций найдем плотность вероятностей распределения величины z :

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z_1) \cdot f_{z_2}(z + z_1) \cdot dz_1, \quad (10)$$

где $f(z_1)$ – плотность вероятностей распределения значений ординат неровностей связки; $f_{z_2}(z+z_1)$ – плотность вероятностей распределения значений ординат неровностей поверхности заготовки $z_2=z+z_1$.

Зерно размером d_z может оставить царапину на поверхности заготовки, если оно занимает такое положение на неровностях доводочного ролика, при котором $(z-d_z) < 0$. Так как размеры зерен и ординаты неровностей контактирующих поверхностей заготовки и инструмента независимые величины, то

$$P(d_z / z) = \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (11)$$

Если плотность вероятности распределения диаметральных размеров зерен в доводочной пасте обозначить через $f(d_z)$, то согласно определению вероятности имеем:

$$P(d_z) = f(d_z) d d_z. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) равенство (9) примет вид:

$$P(z, d_z) = \sum_{d_z=d_{\min}}^{d_{\max}} f(d_z) \cdot d d_z \cdot \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (13)$$

При большом числе контактирующих с поверхностью заготовки абразивных зерен от суммирования в выражении (2.13) можно перейти к интегрированию:

$$P(z, d_z) = \int_0^{\infty} f(d_z) \cdot d d_z \cdot \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (14)$$

Выражение (14) представлено в общем виде. Подставив в это выражение значения плотностей вероятности распределения диаметральных размеров зерен и расстояний между неровностями заготовки и инструмента, можно получить частные решения. Например, практика показывает, что диаметральные размеры зерен распределяются по закону Гаусса:

$$f(d_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \cdot e^{-\frac{(d_z-d_0)^2}{2\sigma_d^2}}. \quad (15)$$

Распределения ординат микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки также обычно подчиняются нормальному закону. Как известно, композиция нормальных законов распределения соответствует нормальному закону. Поэтому

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}}, \quad (16)$$

где σ_z – среднее квадратическое отклонение значений ординат расстояний между смежными точками микронеровностей заготовки и инструмента, равно:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2}, \quad (17)$$

σ_{z1} и σ_{z2} – средние квадратические отклонения распределения значений ординат микронеровностей инструмента и заготовки; z_s – среднее значение расстояний между смежными точками микронеровностей заготовки и инструмента.

Из работы [2]

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\pi}{2}} R_a ,$$

где R_a – среднее квадратическое отклонение микронеровностей поверхности.

Очевидно, что в начальный момент контакта среднее значение расстояния между микронеровностями заготовки и инструмента можно принять равным:

$$z_s = 3 \cdot (\sigma_{z1} + \sigma_{z2}) . \tag{18}$$

Подставив значения плотностей вероятностей распределения размеров абразивных зерен (15) и расстояний между микронеровностями поверхностей заготовки и инструмента (16) в равенство (14), найдем вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки и инструмента:

$$P_k = P(z, d_z) = \frac{1}{2\pi\sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^\infty e^{-\frac{(d_z-d_0)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot dd_z \cdot \int_0^{d_z} e^{-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dz . \tag{19}$$

Используя равенство (19) при условиях (17) и (18) и принимая $\sigma_d=0,33d_0$, определим значения вероятностей P_k , представленных в табл. 1.

Таблица 1

Значение вероятности P_k

z/σ_z $\sigma d/\sigma_z$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	0,500	0,308	0,159	0,067	0,023	0,006	0,001
0,5	0,764	0,674	0,594	0,494	0,403	0,314	0,232
1,0	0,908	0,868	0,813	0,751	0,671	0,596	0,498
2	0,981	0,972	0,959	0,942	0,920	0,891	0,854

Здесь σd – среднее квадратическое отклонение размеров зерен; σ_z – среднее квадратическое отклонение величины z .

Значение вероятности контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки, определяемое равенством (19), справедливо только при малых нагрузках на поверхность контакта инструмента и заготовки, когда деформация микронеровностей мала по сравнению с их высотой. С увеличением деформации микронеровностей поверхностей на площадке контакта вероятность контакта абразивных зерен с поверхности заготовки возрастает.

Если деформация микронеровностей при контакте заготовки и инструмента значительна по сравнению с высотой микронеровностей, то плотность вероятностей распределения ординат микропрофиля поверхности будет соответствовать усеченному закону нормального распределения:

$$f(z) = \frac{A_z}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}} \quad \text{при } 0 < z \leq z_{\max} , \tag{20}$$

где

$$A_z = \frac{1}{0,5 + F(z_{\max} / \sigma_z)} , \tag{21}$$

$$F(z_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot \int_0^{z_{\max}/\sigma_z} e^{-\frac{z}{2\sigma_z^2}} \cdot dz .$$

В равенствах (16) z_{\max} – максимальное расстояние между смежными точками микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки. Если принять поле рассеивания микронеровностей как для любого нормального процесса равным $6\sigma_z$, то с учетом деформации микронеровностей в процессе контакта заготовки и инструмента

$$z_{\max} = 6 \cdot \sigma_z - \varepsilon_{xy} ,$$

где ε_{xy} – величина деформации микронеровностей при контакте поверхностей.

Подставляя равенства (15) и (20) в (14), найдем вероятность контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки с учетом деформации микронеровностей:

$$P(z, d_z) = \frac{A_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z - d_a)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot dd_z \cdot \int_0^{d_z} e^{-\frac{(z - z_x)^2}{2\sigma_z^2}} dz . \quad (22)$$

Значения $P(z, d_z)$ легко определяются с помощью программных средств.

Величина деформации неровностей рабочей поверхности инструмента будет зависеть от усилия его прижима к поверхности заготовки и шероховатости рабочей поверхности инструмента. Обычно шероховатость поверхности заготовки более чем на порядок меньше шероховатости рабочей поверхности инструмента. Это, например, подтверждено результатами экспериментальных исследований, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Изменение шероховатости поверхности инструмента и заготовки
в процессе элеваторной доводки шариков

Степень точности	Шероховатость поверхности, мкм		
	доводочных дисков		шариков
	R_a	R_z	R_a
60 (III)	2,0; 2,5; 2,5	14; 14; 18	0,14±0,13
40 (II)	2,7; 2,8; 2,5	14; 16; 14	0,08±0,07
20±28 (I)	2,4; 2,4; 2,4	12; 14; 15	0,05±0,05
10±16 (0)	2,2; 2,2; 2,4	12; 12; 13	0,03±0,03
5 (01)	1,0; 1,0; 1,2	8,0; 7,0; 9,0	0,02±0,02
5 (02)	0,9; 1,0; 1,2	6,0; 8,0; 7,0	0,02±0,02

Как видно из табл. 2, при получении шариков высших степеней точности максимальная высота микронеровностей R_{\max} поверхности дисков составляет 6-8 мкм. Указанный вывод относится не только к процессу доводки шариков, но практически ко всем методам доводки.

Поэтому вследствие малой величины шероховатости поверхности заготовки влиянием ее на фактическую площадь контакта с рабочей поверхностью доводочного инструмента в процессе доводки можно пренебречь. Из-за невысокой скорости инструмента в процессе доводки влияние гидродинамического эффекта в зоне контакта заготовки и инструмента, а также влияние сил внедрения абразивных зерен в поверхность заготовки на величину сближения поверхностей заготовки и инструмента также не учитываем.

Найдем значение величины деформации микронеровностей в процессе контакта заготовки с рабочей поверхностью инструмента. Вначале для простоты рассмотрим поверхность заготовки абсолютно гладкой, поверхность же рабочей поверхности инструмента шероховатой. Примем условно поверхность заготовки криволинейной, а поверхность инструмента плоской. Под действием силы сжатия между заготовкой и инструментом $P_{\text{ш}}$ происходит деформация неровностей инструмента (рис. 2).

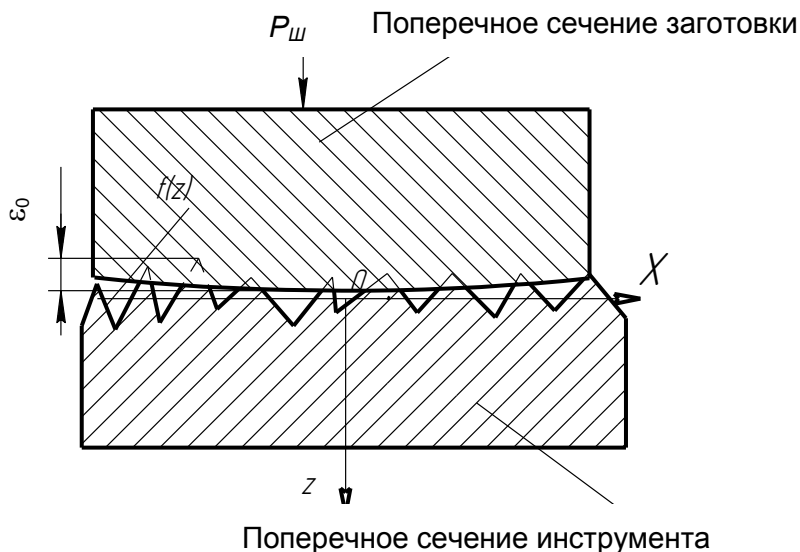


Рис. 2. Сечение заготовки и инструмента в направлении OX

Построим криволинейную систему координат, взяв за ось OX среднюю линию микронеровностей инструмента в направлении качения заготовки, за ось OY – среднюю линию микронеровностей инструмента в поперечном направлении, за ось OZ – нормаль к поверхностям заготовки и инструмента, проходящую через центр симметрии их площадки контакта. Величина деформации микронеровностей инструмента в произвольной точке M(x,y) вдоль оси OZ будет представлять собой сближение микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки ε_{xy} .

По данным работ [2-4] в общем виде величину сближения шероховатых поверхностей при упругом контакте микронеровностей в зависимости от контурного давления можно выразить степенной зависимостью:

$$\varepsilon_{xy} = N_\varepsilon \cdot \vartheta^{2/2\nu+1} \cdot p_{xy}^{2/2\nu+1}, \quad (23)$$

где ε_{xy} – величина деформации микронеровностей в точке (x,y); ν – показатель степени; N_ε – коэффициент, зависящий от механических и геометрических свойств контактирующих микронеровностей; p_{xy} – контурное давление на контакте; ν – упругая постоянная, равная

$$\nu = \frac{1 - \mu^2}{E},$$

μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала инструмента.

Величину коэффициента N_ε в выражении (23) для случая упругого контакта микронеровностей можно определить по данным работы [3]:

$$N_\varepsilon = \left(\frac{0,75 \cdot \pi^2 \cdot \rho^{0,5} \cdot R_{\max}^\nu}{K_\nu \cdot \pi \cdot \nu \cdot (\nu - 1) \cdot \eta} \right)^{2/2\nu+1}, \quad (24)$$

где K_ν – коэффициент, зависящий от ν (при $\nu=1,5$ $K_\nu=0,4$; при $\nu=2,5$ $K_\nu=0,12$); η – коэффициент, характеризующий форму кривой опорной поверхности); ρ – радиус округления вершин микронеровностей; R_{\max} – максимальная высота микронеровностей.

Для случая пластического контакта по данным работы [3] имеем:

$$\varepsilon_{xy} = \left(\frac{p_{xy}}{\eta \cdot \sigma_k} \right)^{\frac{1}{\nu}}, \quad (25)$$

где σ_k – напряжения пластической деформации микронеровностей, зависящие от твердости материала поверхностей.

Из двух значений ε_{xy} , подсчитанных исходя из упругого и пластического контакта микронеровностей, принимают меньшее значение.

Необходимые данные для расчета параметров микрорельефа поверхности можно определить из табл. 3.

Таблица 3

Параметры микрорельефа поверхностей стальных деталей [3]

Вид обработки	R_a , мкм	R_{max} , мкм	ρ , мкм	η	ν
Круглое шлифование	1,25	9,38	8	0,6	2
	0,63	4,72	12	0,9	1,95
	0,32	2,4	20	1,27	1,9
	0,16	1,2	30	2	1,9
Внутреннее шлифование	2,5	18,75	5	0,65	2
	1,25	9,37	8	0,9	1,9
	0,63	4,72	13	1,1	1,85
	0,32	2,4	18,5	1,35	1,75
Плоское шлифование	2,5	18,75	100	0,9	1,95
	1,25	9,37	180	0,95	1,85
	0,63	4,72	370	1,6	1,8
	0,32	2,4	550	2,3	1,65
Суперфиниширование, хонингование	0,63	4,72	15	0,75	1,8
	0,32	2,4	20	1	1,75
	0,16	1,2	35	1,95	1,6
	0,08	0,6	70	2,5	1,5

Представленные выше выражения (23)-(25) для определения деформации микронеровностей заготовки и инструмента справедливы также и для случая, когда инструмент имеет криволинейную форму шероховатость поверхности заготовки соизмерима с шероховатостью поверхности инструмента.

Если все параметры микропрофиля заготовки обозначить индексом 1, а все параметры микропрофиля инструмента индексом 2, то в формулах (23)-(25) параметры контакта поверхностей определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}
 R_{max} &= R_{1max} + R_{2max} ; \\
 \vartheta &= \vartheta_1 + \vartheta_2 = \frac{1-\mu_1^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi \cdot E_2} ; \\
 \nu &= \sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2} ; \\
 \rho &= \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} ; \\
 \eta &= \frac{K_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{max}^\nu}{R_{max1}^{\nu_1} \cdot R_{max2}^{\nu_2}} .
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Значения K_2 в формуле (26) определяются из табл. 4 в зависимости от значений v_1 и v_2 .

Таблица 4

Значения коэффициента K_2

v_1	v_2		
	0,5	1,5	2,5
0,5	0,50	0,33	0,25
1,5	0,33	0,16	0,10
2,5	0,25	0,10	0,05

Если заготовка и инструмент имеют разную твердость, то в формуле (21) следует использовать меньшее из этих значений.

В формулах (23) и (25) присутствует величина давления p_{xy} в окрестности произвольной точки площадки контакта с координатами x, y . Найдем это давление.

По формулам теории упругости находим размеры малой и большой полуосей площадки контакта инструмента и заготовки [5-7]:

– для эллиптической площадки контакта

$$b = \mu_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_z \cdot \vartheta}{2 \cdot \sum k_r}}; \quad (27)$$

$$a = b \cdot \sqrt{1 - e_s^2};$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot P_z \cdot \vartheta \cdot D_z \cdot D_r}{\pi \cdot (D_z \pm D_r) \cdot l_r}}, \quad (28)$$

где P_z – внешняя нагрузка на контакт; b и a – соответственно малая и большая полуоси площадки контакта; l_r – длина роликового инструмента; μ_b и e_s – коэффициент и эксцентриситет площадки контакта, зависящие от значения вспомогательных коэффициентов

$$\cos \tau = \frac{-\frac{1}{r_z} - \frac{1}{r_r} \pm \frac{2}{D_z} + \frac{2}{D_r}}{\sum k_r}; \quad (29)$$

$$\sum k_r = \frac{1}{r_z} + \frac{1}{r_r} \pm \frac{2}{D_z} + \frac{2}{D_r}.$$

В равенствах (28) и (29) r_z и r_r – радиусы профиля соответственно заготовки и инструмента, D_z и D_r – диаметры поверхностей соответственно заготовки и инструмента в плоскости качения. Знак «плюс» относится к случаю, когда заготовкой является внутреннее кольцо, знак «минус» относится к случаю, когда заготовкой является наружное кольцо. При $r_z = \infty$ и $r_r = \infty$ получаем контакт двух цилиндров, для которых

$$\cos \tau = 1;$$

$$\sum k_r = 2 \cdot \frac{D_z \pm D_r}{D_z \cdot D_r}.$$

Контактное напряжение в произвольной точке площадки контакта:

– для круговой площадки контакта

$$p_{xy} = p_o \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} ; \quad (30)$$

$$p_o = \frac{3 \cdot P_k}{2 \cdot a \cdot b} ;$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$p_y = p_o \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} ; \quad (31)$$

$$p_o = \frac{2 \cdot P_k}{\pi \cdot l_r \cdot b} ,$$

где p_o – максимальное напряжение, возникающее по центру площадки контакта.

При цилиндрической форме заготовки и инструмента с параллельными осями контактное напряжение не зависит от координаты x .

Сближение заготовки и инструмента под действием внешней нагрузки:

– для эллиптической площадки контакта

$$\delta = \frac{K(e) \sqrt{1 - e_s^2}}{\pi \cdot \mu_b} \cdot \sqrt[3]{\frac{9}{4} \cdot \vartheta^2 \cdot \sum k \cdot P_k^2} ; \quad (32)$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$\delta = \frac{P_r \cdot \vartheta}{\pi \cdot l_r} \cdot \left(\ln \frac{D_z \cdot D_r}{b^2} - 0,814 \right) , \quad (33)$$

где $K(e)$ – полный эллиптический интеграл первого рода.

В формуле (5) присутствует размер площадки контакта в направлении качения b_x с координатой x . Для случая контакта заготовки и инструмента цилиндрической формы с параллельными осями $b_x = b$ и не зависит от абсциссы x .

При контакте заготовки и инструмента с выпуклым профилем

$$b_x = b \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} . \quad (34)$$

Если заготовка и инструмент имеют цилиндрическую форму, но их оси не параллельны, а скрещиваются под углом α_r , то при их контакте образуется эллиптическая площадка контакта, а при расчетах по формулам (27), (29), (30), (32) и (34) следует использовать следующие значения радиусов кривизны профиля поверхностей контакта:

$$r_z = \frac{D_z}{2 \cdot \sin \frac{\alpha_r}{2}} ; \quad (35)$$

$$r_r = \frac{D_r}{2 \cdot \sin^2 \frac{\alpha_r}{2}} .$$

Используя выражения (22), (23), (30) и (31), можно определить усредненное значение вероятности P_k контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки вдоль полоски контак-

та с абсциссой x , присутствующей в формуле (5). Для этого найдем усредненное значение деформации микронеровностей на площадке контакта. Подставив в равенство (23) выражение (30) или (31) и проинтегрировав его вдоль оси полоски контакта, найдем:

$$\varepsilon_x = N_\varepsilon \cdot \mathfrak{G}^{2/2\nu+1} \cdot p_o^{2/(2\nu+1)} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{1/(2\nu+1)} \cdot K_x, \quad (36)$$

где

$$K_x = \frac{1}{2} \cdot \int_0^1 u^{-\frac{1}{2}} \cdot (1-u)^{\frac{1}{2\nu}+1} du = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\partial\left(\frac{2 \cdot \nu + 2}{2 \cdot \nu + 1}\right)}{\partial\left(\frac{3 \cdot \nu + 2,5}{2 \cdot \nu + 1}\right)}. \quad (37)$$

В равенстве (37) величина $\Gamma(x)$ представляет собой табулированную гамма-функцию.

Равенство (36) справедливо для эллиптической площадки контакта. Для прямоугольной площадки контакта средняя величина деформации микронеровностей не зависит от значения x и равна:

$$\varepsilon_x = N_\varepsilon \cdot \mathfrak{G}^{2/2\nu+1} \cdot p_o^{2/(2\nu+1)} \cdot K_x. \quad (38)$$

Значение величины K_x для различных значений ν представлено в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость значения коэффициента нагрузки K_x от значений показателя формы микронеровностей ν

ν	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
K_x	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95

Как видно из табл. 5, значение коэффициента K_x слабо зависит от значений ν и при больших значениях ν его можно принять равным единице.

Вычислив значение ε_x по формуле (36) или (38), определим значение P_k в равенстве (5):

$$P_k = P(z, d_z), \quad (39)$$

где величина $P(z, d_z)$ находится по формуле (22) при

$$A_z = \frac{1}{0,5 + F(z_{\max} / \sigma_z)}, \quad (40)$$

$$F(z_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot \int_0^{(3\sigma_z - \varepsilon_x) / \sigma_z} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dz.$$

Определим значение относительной частоты вращения центра роликов и заготовки n_Δ равенства (5). Для этого воспользуемся зависимостями, приведенными в работе [5]. С учетом того, что при вращении заготовки центры инструментальных роликов также перемещаются вокруг ее оси, величина n_Δ равна:

$$n_\Delta = \frac{1}{2} \cdot |n_n - n_v| \cdot \left(1 \pm \frac{D_r}{D_z \pm D_r}\right), \quad (41)$$

где n_n и n_v – частота вращения соответственно наружного и внутреннего кольца.

Знак «плюс» в равенстве (41) используется, если в качестве заготовки рассматривается внутреннее кольцо, знак «минус» – если в качестве заготовки рассматривается наружное кольцо.

Наконец, для того, чтобы воспользоваться равенством (5), остается определить среднее значение объема царапины V_{oi} , оставляемой абразивными зернами на поверхности заготовки. Объем единичной царапины равен

$$V_i = S_i \cdot l_i, \quad (42)$$

где S_i – поперечное сечение царапины; l_i – длина царапины.

Площадь поперечного сечения одной царапины зависит от геометрической формы рабочей части зерен и глубины их внедрения в поверхность заготовки. Экспериментальные исследования геометрической формы зерен дают противоречивые результаты относительно параметров их режущей части и радиуса округления при вершине. Аналитические же исследования [1] показали, что геометрическая форма режущей части зерен близка к параболе, а соотношение между ее шириной b и высотой a имеет следующий вид:

$$b_i = 3,8 \cdot a_i, \quad (43)$$

где a_i – глубина царапины.

Площадь же поперечного сечения царапины от единичного зерна также можно определить из работы [1]:

$$S_i = 2,53 \cdot a_i^2. \quad (44)$$

Определим длину царапины:

$$l_i = b_i + v_{\Delta} \cdot t_i = 3,8 \cdot a_i + v_{\Delta} \cdot t_i, \quad (45)$$

где v_{Δ} – скорость микропроскальзывания поверхностей инструментального ролика и заготовки в зоне контакта; t_i – время непрерывного контакта абразивного зерна с заготовкой.

Время контакта абразивного зерна с поверхностью заготовки равно:

$$t_i = \frac{b}{\pi \cdot (D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}}. \quad (46)$$

В равенстве (46) знак «плюс» используется в случае, если заготовкой является внутреннее кольцо, и знак «минус» – если заготовкой является наружное кольцо.

Скорость микропроскальзывания контактирующих поверхностей заготовки и инструментального ролика зависит от упругой деформации контактирующих поверхностей:

$$v_{\Delta} = 2 \cdot \pi \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n_z, \quad (47)$$

где δ_{Σ} – суммарная деформация микронеровностей $\varepsilon_o = \varepsilon_{x=0}$ и поверхностей заготовки и инструмента δ в центре площадки контакта:

$$\delta_{\Sigma} = \delta + \varepsilon_o. \quad (48)$$

Подставляя равенства (46) и (47) в выражение (45), получим:

$$l_i = 3,8 \cdot a_i + 2 \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n \cdot \frac{b}{(D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}}. \quad (49)$$

Используя равенства (44) и (49), преобразуем выражение (42):

$$V_i = 2,53 \cdot a_i^2 \cdot \left(3,8 \cdot a_i + 2 \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n_z \cdot \frac{b_x}{(D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}} \right). \quad (50)$$

Глубина внедрения зерна в поверхность заготовки является случайной функцией от двух случайных величин – диаметра абразивного зерна и расстояния между соответствующими точками микронеровностей заготовки и инструмента:

$$a_i = K_{HB} \cdot (d_z - z) \text{ при } (d_z - z) > 0 ;$$

$$a_i = 0 \text{ при } (d_z - z) \leq 0 ,$$
(51)

где K_{HB} – коэффициент, определяющий, какая часть размера зерна внедряется в поверхность заготовки.

Найдем значение этого коэффициента. При вдавливании зерен в поверхность заготовки в месте их контакта возникает напряжение, равное [3]:

$$\sigma_k = c \cdot \sigma_s ,$$
(52)

где σ_s – предел текучести наклепанного металла; c – коэффициент, зависящий от формы неровностей.

Для случая абразивной обработки, при которой неровности режущей части зерен являются пологими, в равенстве (52) можно приближенно считать [3]:

$$\sigma_k = HB ,$$
(53)

где HB – твердость по Бринеллю (при больших значениях твердости ее можно заменить твердостью по Виккерсу).

На основе (51) силу вдавливания абразивных зерен в поверхности заготовки и инструмента определяем из следующих выражений:

$$P_z = S_z \cdot HB_z ;$$

$$P_r = S_r \cdot HB_r ,$$
(54)

где S_z и S_r – площадь контакта зерен соответственно с поверхностями заготовки и инструмента; HB_r и HB_z – твердость инструментального ролика и заготовки соответственно.

Площади контакта зерен с поверхностями заготовки и инструмента найдем, используя равенство (44):

$$S_z = 2,53 \cdot a_z^2 ;$$

$$S_r = 2,53 \cdot a_r^2 .$$
(55)

Подставляя выражения (55) в (54) и приравнивая правые части этих равенств, получим:

$$a_z = a_r \cdot \sqrt{\frac{HB_r}{HB_z}} .$$
(56)

На основании полученного выражения (56) можно определить:

$$K_{HB} = \frac{\sqrt{HB_r}}{\sqrt{HB_r} + \sqrt{HB_z}} .$$
(57)

При $z > d_z$ абразивное зерно не касается поверхности заготовки и не оставляет на нем отпечатка. При $0 < z < d_z$ абразивное зерно частично вдавливается в поверхность заготовки и инструмента. При $z = 0$ зерно полностью погружается в поверхность заготовки и инструмента.

Однако, на самом деле под действием усилий вдавливания в поверхность заготовки и инструмента зерно может разрушаться. В работе [1] показано, что при значительной сжимающей силе зерно раскалывается пополам. Разрушение происходит от растягивающих напряжений, возникающих в зерне в направлениях, перпендикулярных направлению сжимающей

силы. На основе этих исследований можно определить значение критической силы сжатия, при которой происходит разрушение зерна:

$$P_{i\sigma} = N_{\sigma} \cdot |\sigma_p| \cdot d_z^2, \quad (58)$$

где $[\sigma_p]$ – предел прочности материала зерна на растяжение; N_{σ} – коэффициент, зависящий от материала абразивных зерен и дефектов их поверхности.

Приравнивая между собой правые части выражений (54) и (58) с учетом выражений (55), найдем критическую глубину внедрения зерна в поверхность заготовки и инструмента, при которой происходит его разрушение:

$$a_{z\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z}} d_z; \quad (59)$$

$$a_{r\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_r}} d_z.$$

Суммируя правые части равенств (59), получим:

$$a_{\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z \cdot HB_r}} \cdot (HB_z + HB_r) \cdot d_z. \quad (60)$$

С учетом возможности разрушения зерен при глубине взаимодействия с заготовкой и инструментом, определяемой равенством (60), выражение (51) примет вид:

$$a_i = K_{HB} \cdot (d_z - z) \text{ при } K_{\sigma} \cdot d_z \geq (d_z - z) > 0;$$

$$a_i = 0 \text{ при } (d_z - z) \leq 0, \quad (61)$$

где

$$K_{\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z \cdot HB_r}} \cdot (HB_z + HB_r). \quad (62)$$

В соответствии с теоремой о законе распределения функций случайных величин имеем:

$$f(a_i) = K_{HB} \cdot \int_0^{\infty} f(d_z) \cdot f_z(d_z - a_i) dd_z, \quad (63)$$

где $f_z(d_z - a_i)$ – плотность вероятностей (15) распределения расстояний между смежными точками микрорельефа поверхностей заготовки и инструмента $z = d_z - a_i$.

Раскрывая в равенстве (63) значения плотностей вероятностей $f_z(d_z)$ (17) и $f(z)$ (15), с учетом ограничений (61), найдем:

$$f(a_i) = \frac{A_z \cdot A_a \cdot K_{HB}}{2\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z - d_0)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(d_z - a_i)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dd_z. \quad (64)$$

где

$$A_a = \frac{1}{0,5 + F(a_{\max} / \sigma_a)},$$

$$F(a_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a} \cdot \int_0^{K_{\sigma} d_z / \sigma_a} e^{-\frac{(a - a_s)^2}{2\sigma_a^2}} \cdot dz,$$

где σ_a и a_s – среднее квадратическое отклонение и средняя глубина внедрения абразивных зерен в поверхность заготовки.

При нормально протекающем процессе доводки величина A_a должна быть близка к единице. В противном случае на поверхности заготовки будут оставаться глубокие углубления от разрушенных зерен. Поэтому принимая в равенстве (64) $A_a=1$, можно найти среднее значение глубины царапины:

$$a_{io} = \int_0^{\infty} a_i \cdot f(a_i) \cdot da_i = \frac{A_z \cdot K_{HB}}{2\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^{\infty} a_i \cdot da_i \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z-d_o)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(d_z-a_i)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dd_z. \quad (65)$$

Методика определения съема припуска при использовании имитационной технологии абразивной обкаткой заключается в следующем. По формуле (7) определяется число абразивных зерен на единице поверхности инструмента, по формулам (27)-(33) – параметры площадки контакта заготовки и инструмента. Затем находится величина деформации микронеровностей (38) и при использовании этого значения из равенства (39) определяется вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки. Далее по формуле (41) находится значение относительной частоты вращения центра инструментальных роликов и заготовки. Равенство (65) позволяет найти среднее значение глубины царапин от зерен на поверхности заготовки, а равенство (50) – среднее значение объема срезов от зерен. Подставляя найденные величины в равенство (5), определяем значение съема припуска.

Выполненные исследования выявляют механизм процесса абразивной обработки обкаткой и позволяют совершенствовать условия его осуществления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.1. Состояние рабочей поверхности инструмента. Саратов: СГУ, 1987. 180 с.
2. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
4. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 325 с.
5. Спришевский А.И. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1969. 632 с.
6. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов. Саратов: СГУ, 1972. 162 с.
7. Королев А.А. Математическое моделирование упругих тел сложной формы. Саратов: СГТУ, 2001. 128 с.

Королев Альберт Викторович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

Королев Андрей Альбертович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

Решетников Михаил Константинович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

УДК 629.113.012:531.3

И.И. Любимов, В.Г. Львов, А.П. Полушкин, А.М. Сычев

**О ВЛИЯНИИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОНТАЖНЫХ ШАРНИРАХ
АМОРТИЗАТОРА НА КОЛЕБАНИЯ АВТОМОБИЛЯ**

На основе уточненной математической модели системы поддресоривания исследуется влияние на свободные и установившиеся вынужденные колебания автомобиля упругости резиновых элементов в узлах крепления амортизатора. Приводятся сравнительные амплитудно-частотные характеристики колебаний легкового автомобиля при упругом и при жестком креплениях амортизатора.

I.I. Lyoubimov, W.G. Lvov, A.P. Polushkin, A.M. Sitchev

**THE INFLUENCE OF THE ELASTICITY MONTAGE JOINT SHOCK-ABSORBER
ON THE OSCILLATIONS OF THE AUTOMOBILE**

On the basis of improved mathematical model of system suspension the influencing on free and forced steady-stated oscillations sprungmass and unsprungmass of the automobile of elasticity of rubber devices in clusters of strengthening of the shock absorber is researched in this work. The comparative amplitude-frequency characteristics of oscillations of the car at elastic and rigid strengthenings of the shock absorber are also described in the article.

Известно, что результативность моделирования реальных рабочих процессов, происходящих в агрегатах и системах автомобиля, зависит от принимаемых упрощений и допущений, поэтому использование более полных и точных моделей не только значительно сокращает сроки разработки конструкции, но и снижает затраты на дорогостоящий натурный эксперимент. С точки зрения колебаний автомобиль представляет собой сложную нелинейную динамическую систему, состоящую из различных масс, соединенных упругими и демпфирующими элементами. В расчетные схемы обычно включают поддресоренные массы автомобиля (кузов) M_p , вес которых через упругие элементы подвески и амортизаторы передается на неподдресоренные массы (мосты, колеса) M_n . Массы упругих и демпфирующих элементов подвески, стабилизаторов, рычагов и тяг направляющих устройств и рулевого привода условно относят к частично поддресоренным и неподдресоренным массам, которые рассматриваются как твердые тела, а резинометаллические шарниры крепления амортизатора как абсолютно жесткие. Однако, как показывают исследования [1,2,3], упругие свойства монтажных шарниров амортизатора (шарниров проушин, штыревых шарниров) существенно влияют на колебания автомобиля. Так Й. Раймпель в книге «Шасси автомобиля. Элементы подвески» [1] утверждает, что «динамическая деформация резиновых элементов шарниров приводит к повышению частоты собственных колебаний по сравнению с расчетной при жестких шарнирах до 10-15%». К подобному выводу приходит и А.Д. Дербаремдикер, который в книге по гидравлическим амортизаторам [2] пишет, что «исследования, выполненные Московским карбюраторным заводом (МКЗ) совместно с кафедрой теоретической механики Московского автодорожного института (МАДИ), показали, что при наличии резиновых втулок в монтажных узлах амортизаторов, в отличие от жестких шарниров, начало отрыва колес

возникает при большей (на 10-15%) частоте возбуждения». Нарушение контакта колес с дорогой обычно происходит в условиях резонансных колебаний неподрессоренных масс, поэтому наблюдаемое смещение высокочастотного резонанса обусловлено влиянием динамической деформации резинометаллических шарниров крепления амортизатора. Об этом же свидетельствуют и результаты диагностирования работоспособности амортизатора на стенде, разработанном в ООО «НПЦ-ЛАДА» [3]: частота колебаний виброплощадки стенда, при которой изменение колесной нагрузки на нее достигает максимального значения, оказывается на 8-15% выше, чем расчетная частота собственных колебаний неподрессоренных масс при жестком креплении амортизатора.

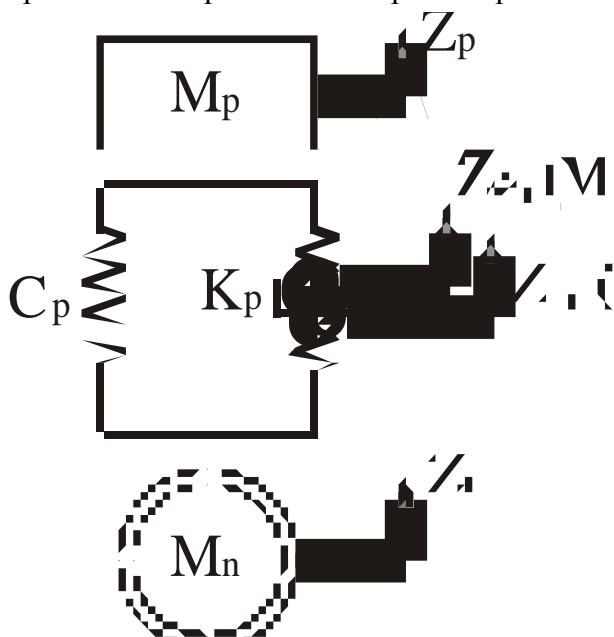


Рис. 1. Расчетная схема подвески

Основной задачей настоящего исследования является определение влияния жесткости упругих элементов крепления амортизатора на свободные и вынужденные гармонические колебания автомобиля с линейной системой подвески (рис. 1) амортизатор представляется двумя массами – массой его цилиндра M_{ap} , отнесенной к поддрессоренным частям автомобиля, и массой поршня со штоком M_{an} , отнесенной к неподрессоренным частям. Соединение масс M_{ap} и M_{an} с поддрессоренными и неподрессоренными массами автомобиля осуществляется не жестко, а через упругие элементы шарниров крепления амортизатора с коэффициентами жесткости C_{ap} и C_{an} (здесь $C_{ap}=C_{an}=C$). Рабочие характеристики упругого элемента подвески и амортизатора приняты линейными и характеризуются, соответственно, жесткостью C_p и коэффициентом вязкостного сопротивления K_p . Также линейными считаем упругую характеристику шины с коэффициентом жесткости C_n и

ее демпфирующую способность, характеризуемую коэффициентом вязкостного сопротивления K_n . Автомобиль рассматривается как симметричный относительно продольной плоскости, проходящий через его центр масс; пространственная модель заменяется плоской и учитываются только продольные колебания. Для упрощения расчетов и анализа получаемых результатов взаимное влияние колебаний частей кузова, расположенных в зонах переднего и заднего мостов не учитывалось, поэтому коэффициент распределения поддрессоренных масс принят равным единице, что является общепринятым допущением при исследовании колебаний автомобиля.

Математическая модель, описывающая движение поддрессоренных и неподрессоренных масс при кинематическом возбуждении колебаний, представляет собой систему из четырех дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{aligned}
 M_p \cdot \ddot{Z}_p + (C_p - C_{ap}) \cdot Z_p - C_p \cdot Z_n + C_{ap} \cdot Z_{ap} &= 0; \\
 M_{ap} \cdot \ddot{Z}_{ap} + K_p \cdot \dot{Z}_{ap} - K_p \cdot \dot{Z}_{an} - C_{ap} \cdot Z_p + C_{ap} \cdot Z_{ap} &= 0; \\
 M_{an} \cdot \ddot{Z}_{an} - K_p \cdot \dot{Z}_{ap} + K_p \cdot \dot{Z}_{an} + C_{an} \cdot Z_{an} - C_{an} \cdot Z_n &= 0; \\
 M_n \cdot \ddot{Z}_n + K_n \cdot \dot{Z}_n + (C_p + C_{an} + C_n) \cdot Z_n - C_p \cdot Z_p - C_{an} \cdot Z_{an} &= C_n \cdot q + K_n \cdot \dot{q}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Частоты собственных колебаний поддресоренных и неподдресоренных масс находим, составляя и решая характеристическое (частотное) уравнение, соответствующее системе (1). Как видно из представленных на рис. 2 графиков, частота собственных колебаний поддресоренных масс ω_p с увеличением жесткости C_a уменьшается, асимптотически приближаясь к значению при жестком креплении амортизатора ($C_a=\infty$). Собственная частота неподдресоренных масс ω_n с увеличением жесткости C_a сначала возрастает (рис. 2,б) до максимального значения, а затем снижается и при дальнейшем увеличении C_a стремится к значению, соответствующему жестким шарнирам амортизатора. С ростом сопротивления амортизатора собственные частоты ω_p и ω_n , как видно из рис. 2, повышаются во всем диапазоне изменения жесткости C_a . При увеличении сопротивления амортизатора плавный, без экстремума, характер изменения частоты ω_p в зависимости от жесткости C_a сохраняется. Характер зависимости $\omega_n=f(C_a)$ также сохраняется, но своего максимального значения собственная частота колебаний ω_g неподдресоренных масс достигает при более высоких коэффициентах жесткости C_a .

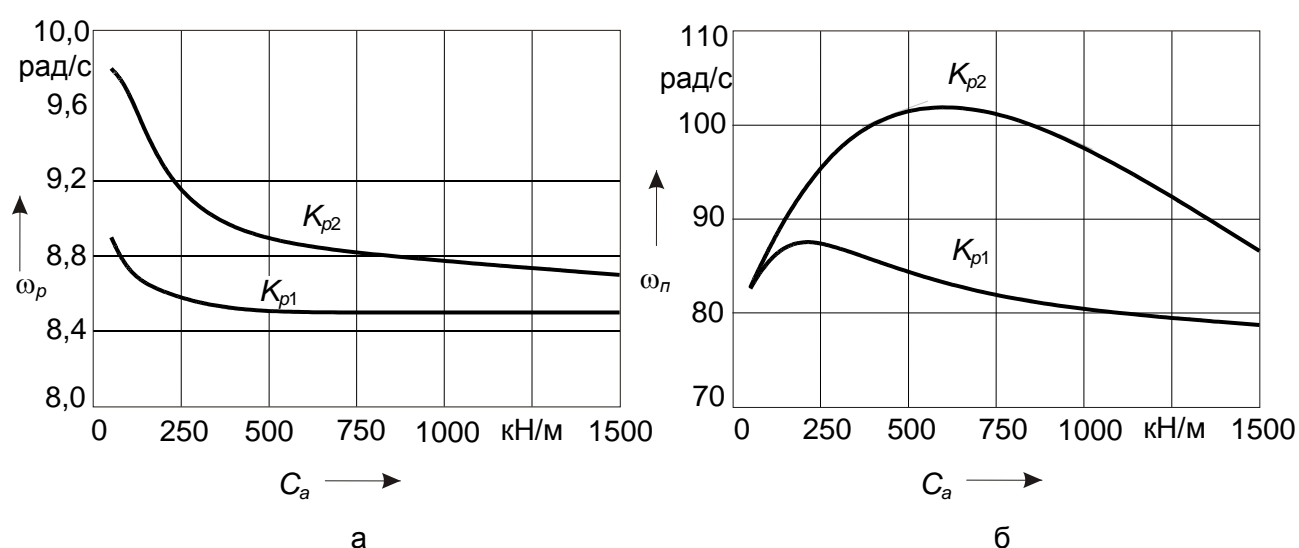


Рис. 2. Влияние жесткости C_a шарниров крепления амортизатора на частоты собственных колебаний поддресоренных (а) и неподдресоренных (б) масс легкового автомобиля при различных сопротивлениях амортизатора ($K_{p2} > K_{p1}$)

Результаты исследования влияния упругости шарниров амортизатора на вынужденные гармонические колебания автомобиля представлены на рис. 3,а, где приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вертикальных перемещений кузова и колес легкового автомобиля. Для сравнения, на рис. 3,б показаны такие же АЧХ, рассчитанные для схемы подвески с жестким креплением амортизатора. Как видно из графиков, упругость шарниров амортизатора, практически не оказывая влияния на колебания кузова, заметно увеличивает интенсивность колебаний неподдресоренных масс, смещая при этом зону высокочастотного резонанса в область более высоких частот, чем при жестких шарнирах и с увеличением сопротивления амортизатора величина смещения возрастает. В отличие от упругого крепления при жестком креплении амортизатора, как видно из рис. 3,б, частотный диапазон с максимальными перемещениями колеса при увеличении сопротивления амортизатора смещается в сторону меньших частот. Наблюдаемое существенно большее влияние упругости шарниров амортизатора на колебания неподдресоренных частей автомобиля обусловлено прежде всего их меньшей, в сравнении с поддресоренными частями, массой.

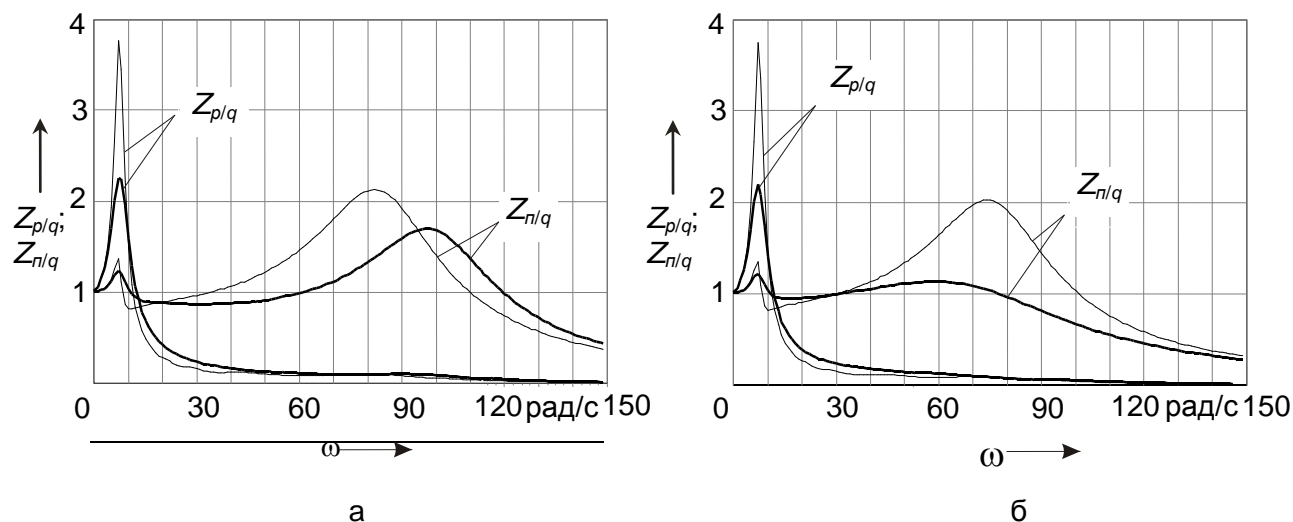


Рис. 3. Влияние сопротивления амортизатора на АЧХ вертикальных перемещений кузова и колес легкового автомобиля при различных вариантах шарниров амортизатора: а – упругие шарниры; б – жесткие шарниры ($C_a = \infty$): — — K_{p2} ; — — $K_{p2} > K_{p1}$

Как известно, при гармонических колебаниях автомобиля нагрузка, передаваемая колесом на дорогу, не остается постоянной, а изменяется, принимая в течение цикла колебания значения как больше, так и меньше, чем статическая нагрузка N_{st} . На ходе отбоя колесная нагрузка уменьшается, а вместе с ней уменьшаются и предельные по сцеплению колеса с дорогой тяговые и тормозные силы, вследствие чего ухудшается управляемость автомобиля, его тяговая и тормозная динамика и экономичность. Самое низкое значение, которое при отбое принимает колесная нагрузка N_{min} , является одним из показателей стабильности контакта колеса с дорогой.

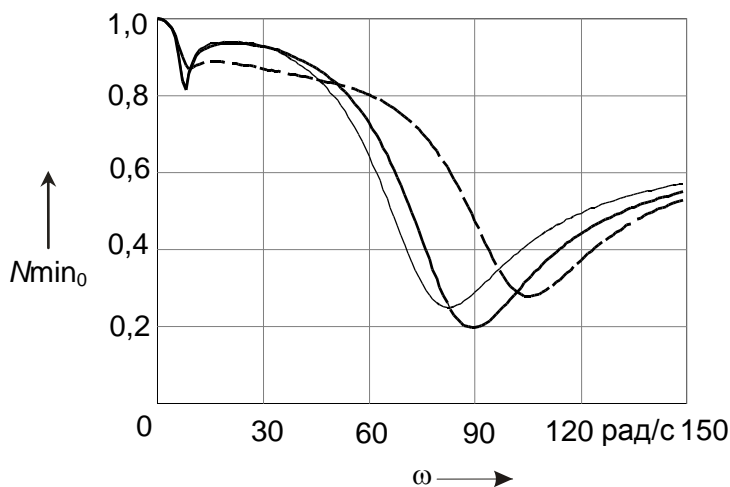


Рис. 4. Частотные характеристики колесной нагрузки N_{min_0} легкового автомобиля: — — при жестких шарнирах амортизатора; — — при упругих шарнирах

Как видно из рис. 4, на котором представлены характеристики изменения относительной колесной нагрузки $N_{min_0} = N_{min} / N_{st}$, пики снижения стабильности контакта наблюдаются в зоне низкочастотного резонанса и, особенно значительный, при высокочастотном резонансе, в области которого абсолютные перемещения оси колеса Z_n и ее перемещения относительно микропрофиля дороги $Z_n - q$ (деформация шины) достигают своих наибольших значений (из-за отставания (фазового сдвига) колебаний колеса от возмущения, создаваемого гармоническим микропрофилем дороги, максимум относительного перемещения колеса $Z_n - q$ в сравнении с максимумом его абсолютного перемещения Z_n наступает при несколько более высокой частоте). А так как при упругих шарнирах амортизатора интенсивность и частота собственных колебаний неподрессоренных масс возрастают (см. рис. 3, б), то колесная нагрузка N_{min} при высокочастотном резонансе уменьшается, в сравнении с жесткими шарнирами и смещается в

область более высоких частот. С ростом сопротивления амортизатора высокочастотный резонансный пик колесной нагрузки N_{min} , вследствие возрастания собственной частоты неподрессоренных масс, смещается в область более высоких частот (пунктирная кривая на рис. 4), что подтверждается и результатами экспериментальных исследований [4].

Расчеты, выполненные по уточненной модели поддрессоривания автомобиля, позволяют сделать следующие выводы:

- упругие элементы в шарнирах крепления амортизатора повышают, в сравнении с жестким креплением, частоту собственных колебаний поддрессоренных масс (кузова) ω_p и неподрессоренных масс (колес) ω_n автомобиля;
- с ростом сопротивления амортизатора собственные частоты ω_p и ω_n возрастают;
- при исследовании вынужденных колебаний автомобиля установлено, что упругость шарниров амортизатора заметное влияние оказывает только на колебания неподрессоренных масс, повышая их интенсивность и смещая зону высокочастотного резонанса в область более высоких частот в сравнении с жестким креплением амортизатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
2. Дербаремдикер А.Д. Гидравлические амортизаторы. М.: Машиностроение, 1969. 236 с.
3. Любимов И.И., Хвостов Е.Д., Львов В.Г. Диагностирование демпфирующих свойств подвески // Эксплуатация современного транспорта: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1997. С.36-40.
4. Колебания автомобиля. Испытания и исследования / Под ред. Я.М. Певзнера. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.

Любимов Иван Иванович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и двигатели»
Саратовского государственного технического университета

Львов Валентин Геннадьевич –

главный инженер ООО «НПЦ-ЛАДА», г. Энгельс

Полушкин Александр Павлович –

инженер ООО «НПЦ-ЛАДА», г. Энгельс

Сычев Александр Михайлович –

ассистент кафедры «Автомобили и двигатели»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.793

С.Г. Мчедлов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Представлена усовершенствованная технология (блок-схема) плазменных покрытий на рабочую поверхность деталей машин при их упрочнении и восстановлении.

S.G. Mchedlov

PLASMA COATING TECHNOLOGY PERFECTION AT MACHINE PARTS CONSOLIDATION AND RECONSTRUCTION

The article presents improved technology (block-scheme) of plasma coating of machine parts' working surfaces at their reinforcing and reconstruction.

Развитие современной техники характеризуется дальнейшей интенсификацией режимов работы машин, что приводит к увеличению рабочих давлений, скоростей, температур, то есть к значительному повышению нагрузок на рабочую поверхность деталей узлов и, особенно, подвижных сопряжений (узлов трения).

Общеизвестно, что основной причиной отказов в работе машин является не их поломка, а износ рабочих поверхностей. Это обстоятельство поднимает актуальность проблемы надежности и ресурса деталей на более высокий уровень [1,7,13,25 и др.].

Решение актуальных проблем повышения надежности и ресурса деталей на современном уровне развития науки и техники осуществляется по ряду направлений, из которых следует выделить тенденцию к повышению прочности и износостойкости деталей путем замены конструкционных материалов новыми с более высокими химико-физико-механическими свойствами. Однако здесь обнаружилось весьма важное негативное обстоятельство, а именно: материалы «старого типа» в условиях интенсивных режимов эксплуатации не обеспечивают должной надежности. Такое положение сдерживает развитие новой техники, что заставляет проводить ряд научно-технических мероприятий, среди которых следует выделить создание новых типов защитных покрытий, в том числе износостойких, на базе применения прогрессивных технологий, в частности плазменных покрытий (плазменное напыление) [6,7,8,12,14,15,25,30 и др.].

Нанесение покрытий методом плазменного напыления является разновидностью газотермических покрытий (детонационное, газоплазменное, электродуговая металлизация, плазменное напыление / наплавка) [6,25 и др.].

Плазменное напыление покрытий основано на использовании энергии низкотемпературной плазмы. Этот метод начал применяться с 50-х годов XX века. Первые отечественные разработки в этом направлении были выполнены в Институте металлургии им. А.А. Байкова под руководством академика А.А. Рыкалина и доктора технических наук И.Д. Кулагина [15].

Низкотемпературная плазма (до 100000 К) обладает высокими энергетическими и газодинамическими параметрами, что делает ее практически универсальным инструментом для напыления покрытий. В плазменной струе практически расплавляется любой материал, известный в природе (чистые металлы, оксиды, силициды, карбиды, нитриды, бориды, их сплавы и др.). Непригодными являются материалы, которые подвержены сублимации и разрушению в плазменной струе. Параметры плазменной струи (мощность, температура, тепловой поток и др.) легко регулируются в современных плазменных установках. Низкотемпературная плазма генерируется в специальных устройствах – плазмотронах (горелках), среди которых наибольшее распространение в технике напыления получили электродуговые плазмотроны. Плазмотрон входит в состав комплекта плазменной установки (см. рис. 1, 2) [6,8,9,15,25,30 и др.].

В качестве исходного газового агента для образования низкотемпературной плазменной струи применяются следующие плазмообразующие газы: аргон Ar, азот N₂, водород H₂, гелий He, аммиак NH₃, углекислый газ CO₂, воздух, их смеси, а также вода H₂O, которые под действием высокой температуры дугового электрического разряда (~6000 К) превращаются в низкотемпературную плазму (→100000 К), истекающую в виде струи с высокой скоростью из сопла –

анода плазмотрона. В плазменную струю подается порошковый материал, преимущественно грануляции 0,04...0,10 мм, который, претерпевая тепловое воздействие плазменной струи, расплавляется / оплавляется и транспортируется на поверхность детали (см. рис. 3).

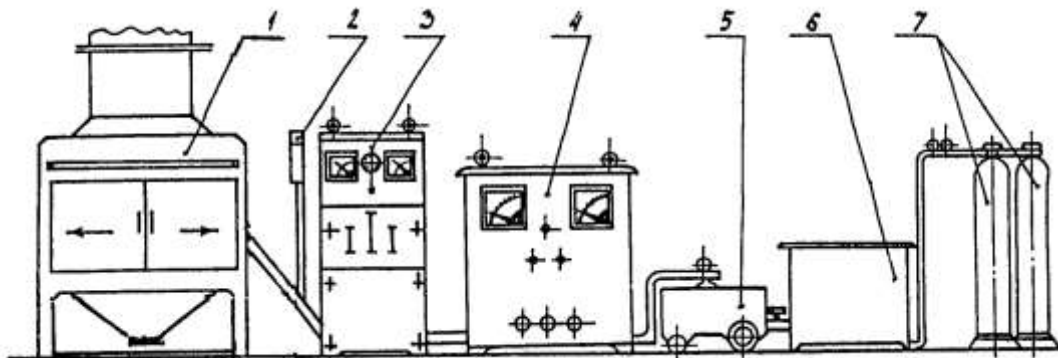


Рис. 1. Схема взаимодействия основного плазменного оборудования для напыления покрытий: 1 – камера для напыления с местной вытяжной вентиляцией; 2 – плазмотрон; 3 – шкаф управления УПУ-3Д; 4 – источник питания ИПН 160/600; 5 – водяной насос; 6 – бак с охлаждающей водой; 7 – баллоны с газом (аргон, азот).
Электродпечь для изотермической обработки деталей и оборудование для механической обработки деталей не показаны

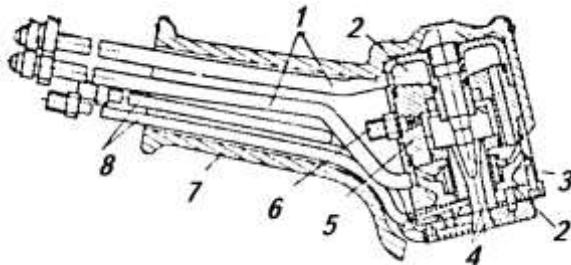


Рис. 2. Схема конструкции электродугового плазмотрона: 1 – подвод постоянного тока и охлаждающей воды; 2 – вода; 3 – катод; 4 – анод; 5 – изолятор; 6 – рабочий газ; 7 – рукоятка; 8 – порошок

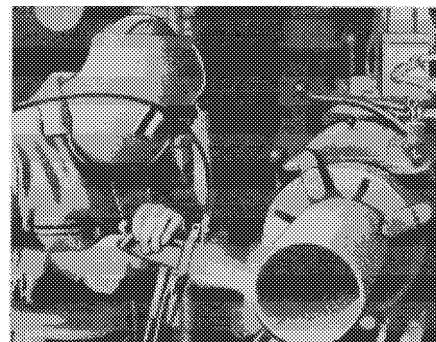


Рис. 3. Плазменное напыление покрытия на деталь порошковым материалом [30]

Проведенный аналитический обзорный анализ известных технологий плазменных покрытий по упрочнению / восстановлению рабочих поверхностей деталей машин, а также выполненный значительный объем экспериментальных исследований по упрочнению / восстановлению широкой гаммы деталей машин, в том числе: коленчатые валы (опорные / шатунные шейки), распределительные валы (опорные шейки), шейки валов коробок передач, крышки подшипников, поворотные кулаки, вкладыши, поршневые кольца, полувтулки подшипников скольжения и ряд других (при широком диапазоне типоразмеров, особенно поршневых колец), позволили установить следующее: применение технологии плазменного напыления защитных покрытий на рабочую поверхность деталей, особенно работающих в подвижном сопряжении (узлы трения), при соблюдении регламентируемых значений техноло-

гических параметров (качество подготовки поверхности, качество подготовки порошкового материала, соблюдение режимов напыления и др.), повышает их ресурс и надежность. Это объясняется прежде всего наличием в покрытии взаимопроникающих объемно-поверхностных пор, в которых *постоянно удерживается смазочный материал*, наличие которого эффективно влияет на работу пары трения, при этом плазменное покрытие должно иметь высокую адгезионную связь с субстратом (основой), что обеспечивается соблюдением требований технологии ($\sigma_{адг.} > \sigma_{кр.}$) [25].

В процессе экспериментальных исследований был обнаружен большой разброс параметров качества плазменных покрытий, в том числе величина адгезионной / когезионной связи, что свидетельствует о скрытых резервах этой технологии. Поэтому была поставлена задача – разработать регламентированный комплексный технологический процесс, обеспечивающий плазменным покрытиям стабильные высокие эксплуатационные параметры качества. Задача была решена. Новизна технических решений подтверждена рядом авторских свидетельств на изобретения, в том числе [26,27].

Обобщенные комплексы взаимосвязанных в определенной последовательности операций (блок-схема, см. рис. 6), разработанного технологического процесса плазменного напыления защитных покрытий при упрочнении и восстановлении рабочей поверхности деталей машин широкой номенклатуры (оси, валы, втулки кольца и другие) приводятся ниже.

1. Анализ особенностей конструкции детали. Определение характера и величины износа рабочей поверхности (при восстановлении)

После того, как деталь будет тщательно очищена от всех видов загрязнений (абсорбций, хемосорбций), она тщательно анализируется по конструктивным признакам (габариты, вес, канавки, острые кромки, особенности поверхностей, характер и величина износа (при восстановлении), наличие трещин, сколов и др.). Анализ проводится опытным технологом, который принимает решение о применении плазменного напыления для упрочнения / восстановления рабочей поверхности детали.

2. Анализ материала конструкционной основы детали.

Устанавливаются марка материала детали, его химический состав, физико-механические свойства (по ГОСТам). Принимается решение о возможном применении плазменного напыления на рабочую поверхность детали.

3. Анализ условий работы детали.

Определяются и анализируются различные факторы воздействия на рабочую поверхность детали (физические, механические, химические и др.). Принимается решение о возможности применения плазменного напыления покрытия на рабочую поверхность. Выбирается (ориентировочно) материал покрытия в зависимости от обеспечения служебных свойств рабочей поверхности.

4. Определение величины (толщины) слоя плазменного покрытия.

Величина слоя напыляемого плазменного покрытия определяется от допустимого значения износа рабочей поверхности при обязательном обеспечении регламентированного ресурса работы детали и экономической целесообразности. Также учитываются когезионные свойства напыляемого материала.

5. Выбор материала для плазменного покрытия и его подготовка для напыления.

Порошковый материал для плазменных покрытий выбирается в зависимости от служебных свойств рабочей поверхности детали, особенностей материала конструкционной основы детали, экономической целесообразности, его технологичности и ряда других факторов. Например, как показали многочисленные исследования, оптимальным вариантом на настоящее время для износостойких антифрикционных плазменных покрытий на рабочие поверхности деталей машин (коленчатые валы, оси, втулки, поршневые кольца и др.) является композиционный порошок с экзотермическим эффектом плакированной конструкции грануляции 0,04...0,10 мм хи-

мической системы (Ni)-(Al), где алюминиевое ядро плакировано никелевой оболочкой (см. рис. 4). Адгезионные свойства этого порошкового материала показаны на рис. 5.

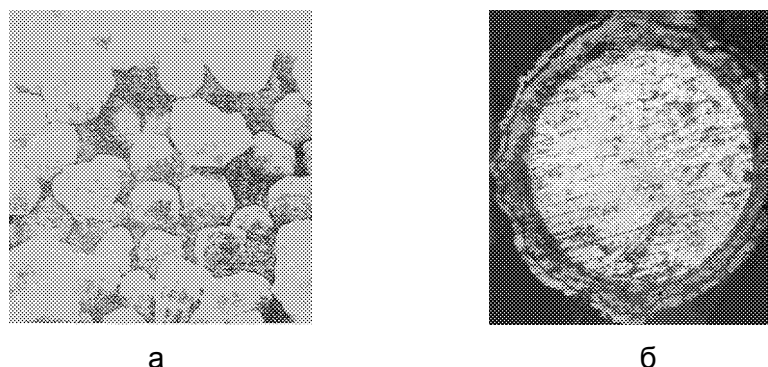


Рис. 4. Частицы композиционного плакированного порошка:
а – общий вид порошка в гранулах 80 (Ni)-20(Al) 250х;
б – сечение одной частицы – 600х [6]

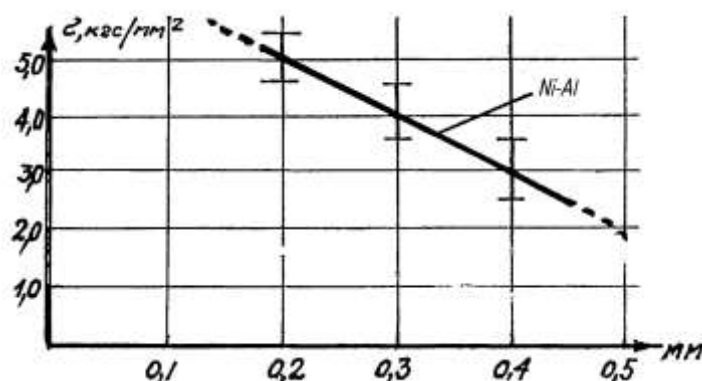


Рис. 5. Схема изменения прочности сцепления σ плазменного покрытия из порошкового материала (Ni)-(Al) на образцах из серого чугуна в зависимости от толщины покрытия

Порошковые материалы, применяемые для плазменного напыления покрытий, весьма гигроскопичны, поскольку в насыпном состоянии содержат сильно развитую капиллярную сеть, образующуюся в результате объединения всех пор, находящихся между частицами порошка, что является причиной капиллярной конденсации влаги из атмосферы воздуха. Просушку порошков осуществляют в зависимости от их химического состава. Чистые металлы, их сплавы и композиты сушат в электропечи при температуре 120...130°C не менее трех часов, при этом порошки находятся в обезжиренных лотках из нержавеющей стали. Охлаждение производят в закрытой печи при отключенной электроэнергии до комнатной температуры 18...25°C. Тугоплавкие порошковые материалы (оксиды, бориды, силициды, карбиды и др.) сушат при температуре 600...700°C в муфельных печах не менее 6 часов. Охлаждение аналогично чистым металлам. После просушки порошки просеивают в вибросите, например мод. 029. Затем порошки рассыпают в герметичную тару. Срок годности этих порошков не более 24 часов. Отсыревшие порошки вновь подвергают вышеописанной обработке (подготовке).

Для тугоплавких порошковых материалов выделяется фракция 0,02...0,07 мм. Для металлов – 0,04...0,10 мм. Следует отметить, что отечественная порошковая металлургия выпускает широкую номенклатуру порошков, пригодных для технологии плазменных покрытий [6].

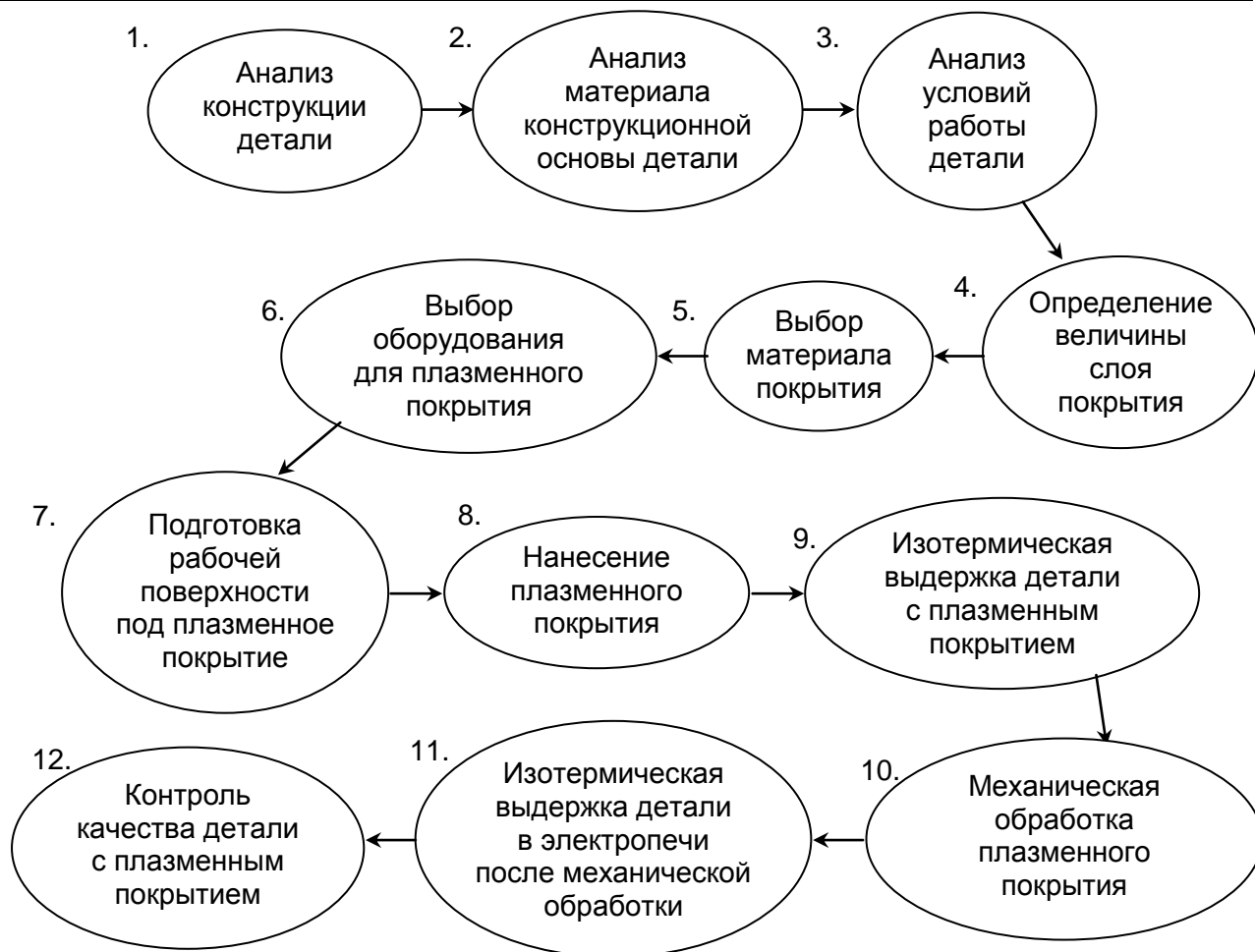


Рис. 6. Блок-схема технологии плазменного напыления покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин

6. Выбор оборудования для плазменного напыления покрытий.

Выбор оборудования для плазменного напыления защитных покрытий на рабочую поверхность деталей машин обусловлен конструкторско-технологическими особенностями детали, служебным назначением покрытия, экономической целесообразностью и рядом других показателей. Как показали экспериментальные работы для широкого диапазона технологий эффективной оказалась отечественная универсальная плазменная установка мод. УПУ (3,3Д, 8М), которая позволяет в качестве плазмообразующих газов применять аргон, азот, водород и обеспечивает нанесение покрытий из металлов, их сплавов, композитов, а также тугоплавких порошков (оксиды, карбиды и др.). Экспериментальные работы, проводимые на УПУ-3Д, позволили получать высококачественные износостойкие плазменные покрытия на коленчатых валах, поршневых кольцах и других деталях машин [25].

7. Подготовка рабочей поверхности детали под плазменное покрытие.

Этот комплекс технологических операций является весьма ответственным. Неправильно подготовленная поверхность под плазменное покрытие неизбежно приводит к отслоению покрытия, то есть к браку.

Детали перед плазменным покрытием должны быть тщательно обезжирены (ацетон, толуол, уайт-спирит и др.). С рабочей поверхности должен быть удален дефектный слой (механическим способом без охлаждающей жидкости) и, с предварительным подогревом, рабочая поверхность должна быть активирована путем сухой струйно-абразивной обдувки при углах обдува, близких к нулю (тангенциально) абразивным агентом, например ДЧК-08 ГОСТ 11964.

8. Нанесение плазменного покрытия.

Качество плазменного покрытия определяется соблюдением режимов технологии напыления, среди которых могут содержаться взаимокompенсирующие параметры (например, мощность – дистанция и др.). Следует обратить особое внимание на квалификацию оператора, который визуально фиксирует качество покрытия. Одним из важнейших показателей качества напыления является прочность сцепления покрытия с субстратом (основой) – адгезия, которая в общем случае зависит от величины тока J , напряжения дуги U , дистанции напыления l , грануляции порошка d_0 , расхода транспортирующего газа G_{mp} , плазмообразующего газов $G_{пл}$, скорости перемещения «пятна» напыления v_n и др.:

$$\sigma_{адг} = f(J, U, l, d_0, G_{mp}, G_{пл}, v_n, \dots).$$

Следует отметить, что перед напылением поверхность детали прогревают плазменным факелом до 100...120°C.

9. Изотермическая выдержка детали с плазменным покрытием.

Для стабилизации свойств покрытия деталь помещают в электропечь при температуре 110...120°C и выдерживают не менее 8 часов, после чего медленно охлаждают в электропечи до комнатной температуры.

10. Механическая обработка плазменного покрытия после изотермической выдержки в электропечи.

В настоящее время нет точных или общепринятых данных (рекомендаций) по режимам механической обработки плазменных покрытий, а также геометрии режущего инструмента. Это обусловлено прежде всего анизотропными свойствами плазменных покрытий, несоответствием коэффициентов термического расширения, резко отличающимися физико-механическими свойствами покрытий, полученных из различных материалов, наличием в плазменном покрытии различных фазовых включений разной твердости и рядом других особенностей, присущих конкретному плазменному покрытию [6,25]. Для конкретных технологий разрабатывают опытным путем свой метод механической обработки плазменных покрытий, исходя из особенностей исходного материала. Это может быть резание или шлифование или комбинированный метод обработки поверхности. Например, для обработки плазменного покрытия из композита химической системы (Ni)–(Al), наносимого на рабочую поверхность поршневых колец номинального диаметра 355 мм, применялся лезвийный способ обработки фасонным резцом из твердосплавного материала марки ВК-6 [25]. Для обработки плазменных покрытий из порошковых материалов химической системы Cr–Ni–B–Si–(Fe) с пониженным содержанием кислорода, которые нашли широкое распространение при восстановлении деталей автотранспорта механическую обработку рекомендуется проводить алмазными кругами.

11. Изотермическая выдержка детали с плазменным покрытием в электропечи.

После механической обработки плазменного покрытия деталь помещают в электропечь при температуре 110...130°C, где выдерживают не менее 8 часов. Охлаждают вместе с отключенной электропечью. Эта операция способствует выравниванию и стабилизации физико-механических свойств в плазменном покрытии за счет перераспределения избыточных внутренних напряжений; происходит перегруппировка дислокаций и вакансий, что ведет к релаксационным процессам и аккомодации в материале покрытия. Теория этих процессов очень сложна и мало изучена [25 и др.].

12. Контроль качества детали с плазменным покрытием.

Контроль адгезионной прочности плазменного покрытия производится на сопутствующих технологических образцах. Контроль пористости также осуществляется на технологических образцах. Следует отметить, что контроль качества плазменного покрытия осуществляется визуально на протяжении всей технологии. Недопустимы следующие виды дефектов: наличие пузырей, вспучиваний, ряби, цветных пятен, сколов, отслоения, шелушения, трещин и др. Покрытие должно иметь равномерно матовый цвет. Микротвердость плазменного покрытия контролируется также на образцах-имитаторах.

Выводы

Предложен концептуальный подход к совершенствованию технологии упрочнения и восстановления рабочей поверхности деталей машин методом плазменного напыления защитных покрытий. Работа основана на проведенных экспериментальных исследованиях [25 и др.]. Рекомендуется углубить теоретические аспекты вышеизложенных операционных комплексов, особенно наукоемких, таких как подготовка поверхности под покрытие, режимы напыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонькин Ф.Н. Повышение срока службы автомобильных двигателей. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1969. 278 с.
2. Алексаньян И.М. Износостойкость поршневых колец // Труды Ростов. ин-та жел.-дор. трансп. Ростов-н/Д, 1975. Вып.9. С.3-5.
3. Аппен А.А. О теоретических критериях адгезии покрытий с металлом // Неорганические и органические покрытия. Л., 1975. С.3-11.
4. Бжозовски В. Низкотемпературная плазма. М.: Мир, 1963. 151 с.
5. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. М.: Metallurgia, 1987. 208 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская: Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 545 с.
7. Вадивасов Д.Г. Восстановление деталей металлизацией. Саратов, 1988. 280 с.
8. Готлиб Л.И. Плазменное напыление. М.: ЦИНТИхимтефтемаш, 1970. 72 с.
9. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 221 с.
10. Клименко Г.К. Генераторы плазмы. М.: МВТУ, 1977. 83 с.
11. Коротаев А.С. Электродуговые плазмотроны. М.: Машиностроение, 1980. 175 с.
12. Костиков В.И., Шестерин Ю.А. Плазменные покрытия. М.: Metallurgia, 1978. 160 с.
13. Крагельский И.В., Михин И.М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984.
14. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. М.: Машиностроение, 1966. 432 с.
15. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
16. Лясников В.Н., Украинский В.С., Богатырев Г.Ф. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. 200 с.
17. Мчедлов С.Г. Плазменное напыление износостойких покрытий на поршневые кольца // Теоретические и технологические основы изготовления поршневых колец: Сб. науч. раб. Саратов: СХИ, 1978. Вып.108. С.80-86.
18. Мчедлов С.Г. Обработка поверхностей под напыление // Автомобильный транспорт. 1990. № 11. С.42.
19. Мчедлов С.Г. Технология упрочнения поршневых колец плазменным покрытием // Актуальные проблемы транспорта Поволжья и пути их решения: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2001. С.149-151.
20. Мчедлов С.Г. Технология формирования высокоэффективной рабочей поверхности деталей машин на основе газотермических покрытий (при изготовлении и восстановлении) // Совершенствование технологии и организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов: Сб. науч. статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: СГТУ, 2003. С.267-268.

21. Мчедлов С.Г. Применение тангенциальной обработки свободным абразивом поршневых колец под плазменное покрытие // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С.10-13.
22. Мчедлов С.Г. Актуальные задачи технологии газотермических покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С.158-161.
23. Мчедлов С.Г. Восстановление деталей двигателя внутреннего сгорания газотермическими покрытиями // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания: Материалы Межгосударств. науч.-техн. семинара. Вып.16. Саратов: СГАУ, 2004. С.110-112.
24. Мчедлов С.Г. Экономическая эффективность поршневых колец с плазменным покрытием в двигателях внутреннего сгорания // Технологическое формирование качества деталей при восстановлении и упрочнении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1977. С.81-85.
25. Мчедлов С.Г. Совершенствование технологии изготовления поршневых колец на основе применения тангенциальной обработки свободным абразивом поверхности под упрочняющее плазменное покрытие: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2002. 16 с.
26. А.с. 1215967 СССР. Способ абразивной обработки наружной поверхности / С.Г. Мчедлов. Б.И. 1986, № 9. 2 с.
27. А.с. 1635080 СССР. Образец для определения прочности сцепления газотермических покрытий с основным материалом / С.Г. Мчедлов. Б.И. 1989, № 29. 2 с.
28. Теория и практика плазменного напыления: Труды МВТУ им. Баумана. М., 1977. Вып.237.
29. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. литературы, 1961. 371 с.
30. Хасуй А. Техника напыления: Пер. с яп. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

Мчедлов Сурен Георгиевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.002.6:519.21

В.М. Шумячер, О.В. Бурлаченко

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Предложена методология, реализующая системный подход к проблеме повышения качества машиностроительной продукции.

Разработана концептуальная модель управления эксплуатационными свойствами сопряжений машин и оборудования, представляющая собой совокупность функционально-структурной схемы информационной управленческой системы, математического, программного и аппаратно-технического обеспечения реализации управленческих функций.

С применением математического аппарата концептуальной модели произведен выбор данных факторов, оптимальных с точки зрения обеспечения наивысших эксплуатационных свойств. На основании полученных результатов разработаны методы технологического повышения эксплуатационных свойств сопряжений.

V.M. Shumyacher, O.V. Burlachenko

TECHNOLOGICAL MAINTENANCE OF THE MACHINE-BUILDING PRODUCTION QUALITY CONTROL

The methodology realizing systematic approach to the problem of machine-building production quality is proposed here.

The conceptual model of the machines and the technological equipment performance control presenting the information control functional structure system, mathematical, program, apparatus-technical maintenance, is done in the article.

Using the conceptual model mathematical apparatus, optimal factors providing the highest working indicators choice is made. The methods of the junctions working indicators raising are worked out on the base of derived results.

Для повышения конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения необходим системный подход к задаче обеспечения и повышения качества ее, заключающийся не только в разработке отдельных методов, обеспечивающих или улучшающих какой-либо показатель работоспособности, но в создании интегрирующей методологической базы, позволяющей объединить функции управления эксплуатационными свойствами (ЭС) на протяжении всего жизненного цикла машины в единый технологический процесс. Подобный подход должен быть реализован на основе технологического и информационно-сетевого обеспечения управления ЭС машин и узлов, в первую очередь сопряжений, при определении оптимальных триботехнических характеристик и при заданных внешних механических параметрах (кинематических и динамических условий работы) контактного взаимодействия.

Разработана концептуальная модель управления ЭС сопряжений машин, представляющая собой совокупность функционально-структурной схемы информационной управленческой системы, алгоритма принятия управленческих решений (рис. 1), математического, программного и аппаратно-технического обеспечения реализации управленческих функций. Подобный алгоритм при применении вероятностных методов позволяет формально представить машину не как статический объект управления, но изменяющий свое состояние на протяжении жизненного цикла. Это дает возможность реализовать системный подход к принятию управленческих решений в зависимости от технического состояния объекта, а также от фазы жизненного цикла (ситуации), в которой он находится. Модель выполняет оптимизационные функции и позволяет добиться существенного снижения трудоемкости поиска и повышения эффективности оптимального технологического решения в зависимости от реального технического состояния и фазы жизненного цикла машины. При этом оптимальное решение принимается по критериям максимального технического эффекта повышения эксплуатационных свойств, минимизации издержек и негативного техногенного воздействия на окружающую среду сравниваемых вариантов технологического обеспечения.

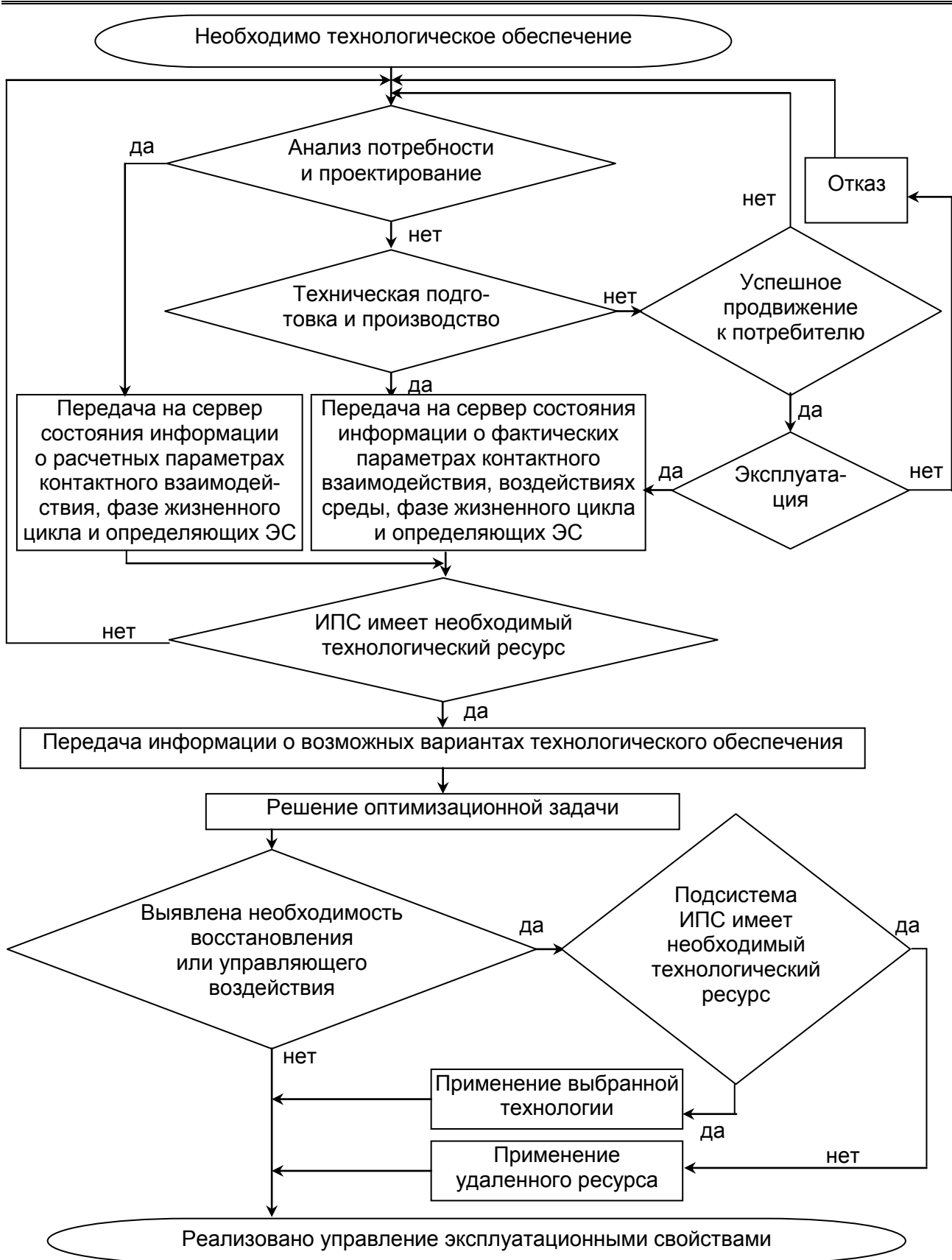


Рис. 1. Алгоритм технологического обеспечения эксплуатационных свойств машиностроительной продукции

Для разработки методологии обеспечения и повышения качества машиностроительной продукции проведены аналитические и экспериментальные исследования зависимости от различных факторов таких эксплуатационных свойств сопряжений, как контактная жесткость, сдвигоустойчивость, герметичность уплотнительных узлов, устойчивость и точность относительных перемещений в кинематических парах трения. В качестве управляемых факторов приняты триботехнические характеристики и внешние механические параметры контактного взаимодействия (силовые и кинематические условия в трибологическом контакте). С применением математического аппарата концептуальной модели произведен выбор данных факторов, оптимальных с точки зрения обеспечения наивысших эксплуатационных свойств. На основании полученных результатов разработаны методы технологического повышения эксплуатационных свойств сопряжений.

Разработаны технологии, базирующиеся на применении концентрированных потоков энергии в виде плазменного напыления и лазерного воздействия в качестве технологического обеспечения управления жесткостными и прочностными характеристиками стыков машин. Применение самофлюсующихся покрытий возможно для повышения контактной жесткости неподвижных соединений деталей машин. Возрастание жесткости, составившее 18-44%, обусловлено лучшими физико-механическими свойствами и характеристиками микронеровностей по сравнению с исходным материалом. Разработана технологическая схема избирательной лазерной закалки контактирующих поверхностей, позволяющая добиться повышения тангенциальной жесткости и сдвигоустойчивости (на 30-40%) неподвижных соединений. Данный вид обработки, заключающийся в нанесении параллельных дорожек лазерного термоупрочнения перпендикулярно действию сдвигающих усилий, одинаковой ширины и с постоянным шагом, приводит к локальному изменению физико-механических свойств материала. При действии нормальной нагрузки происходит перераспределение напряжений по линии контакта с погружением более твердого материала зон лазерной закалки в исходный материал контртела. Получено уравнение, позволяющее установить функциональную зависимость коэффициента трения покоя от изменения триботехнических и геометрических параметров контакта вследствие применения избирательной лазерной закалки

$$f = f_m + \frac{\sigma_{см} \cdot \zeta \cdot b \cdot n \cdot \left[h_0 + \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \frac{[(C_2'' - C_1'') \cdot \sigma_T \cdot N]^{0.5} \cdot \pi \cdot L}{4 \cdot n \cdot R_B \cdot \varphi} \right]}{N}, \quad (1)$$

где f_m – классический коэффициент трения Кулона; $\sigma_{см}$ – приведенное допускаемое напряжение смятия материалов контактирующих деталей; ζ – коэффициент неравномерности распределения сдвигающей нагрузки по выступам; b – ширина зоны контакта; n – количество зон лазерного влияния по длине контакта; h_0 – исходная высота волны; R – коэффициент, зависящий от формы выступов; N – нормальная нагрузка на контакт; E , μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов в зоне контакта; C_1'' и C_2'' – коэффициенты, определяемые соотношением микротвердости материалов контактирующих деталей на необработанных участках и в зонах лазерного упрочнения соответственно; σ_T – предел текучести материала; A_n – номинальная площадь контакта; R_g – радиус закругления волны; φ – центральный угол, $\cos \varphi = h_0/R$; L – длина зоны контакта.

Разработано технологическое обеспечение, позволяющее реализовывать комплексное воздействие на триботехнические и внешние механические параметры контактного взаимодействия стыков с целью повышения герметичности уплотнительных узлов. Для управления внешними механическими параметрами контактного взаимодействия применяется управляющее воздействие на стык в виде программы ступенчатого нагружения с помощью дополнительного нагружающего устройства. Модифицирование свойств активного поверхностного

слоя контактирующих поверхностей осуществляется применением избирательной лазерной закалки. В результате получен уплотнительный узел, обладающий повышенной (в 2,5-3 раза) герметичностью без применения дополнительных герметизирующих элементов (рис. 2).

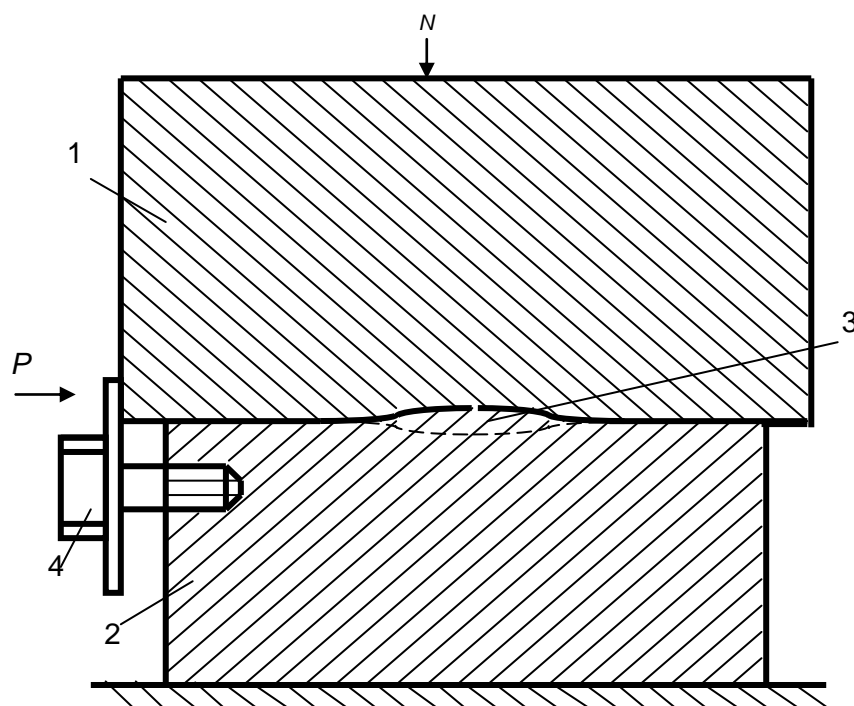


Рис. 2. Герметичное соединение: 1, 2 – стыкующиеся детали; 3 – зоны лазерного влияния; 4 – болт для приложения сдвигающей силы

Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований сопряжений, работающих в условиях малых переменных скоростей относительных перемещений, позволяют получить оптимальные значения внешних механических параметров (частота колебаний скорости скольжения, жесткость условно неподвижной составляющей сопряжения, характеристики смазки и т.д.), обеспечивающие работоспособность сопряжения в фазе его эксплуатации. Применение предложенных методов технологического обеспечения работоспособности кинематических сопряжений дает возможность повышения устойчивости относительного перемещения, точности работы, износостойкости.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможность применения методологии оптимизации триботехнических характеристик и внешних механических параметров контакта, что позволяет реализовать системный подход к решению проблемы управления качеством машиностроительной продукции на протяжении ее жизненного цикла.

Шумячер Вячеслав Михайлович –

доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Технология обработки и производства материалов»
Волжского инженерно-строительного института
Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

Бурлаченко Олег Васильевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология строительного производства»
Волжского инженерно-строительного института
Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.385.01

В.Б. Байбурин, С.А. Трачук

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЗАРЯДОВ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

Проведено численное исследование модели поведения двух зарядов в скрещенных полях. На основе расчета показателей Ляпунова определены области существования регулярного и хаотического поведения систем, получены карты показателей Ляпунова.

V.B. Bayburin, S.A. Trachuk

CHAOTIC DYNAMICS ASSOCIATED CHARGES IN CROSSED FIELDS

Computational solution behavior of model of two charges in crossed fields implemented in the article. On the basis of calculation of Lyapunov exponents it was determined the region of existing regular and chaotic behavior of systems, were received dynamic conditions map.

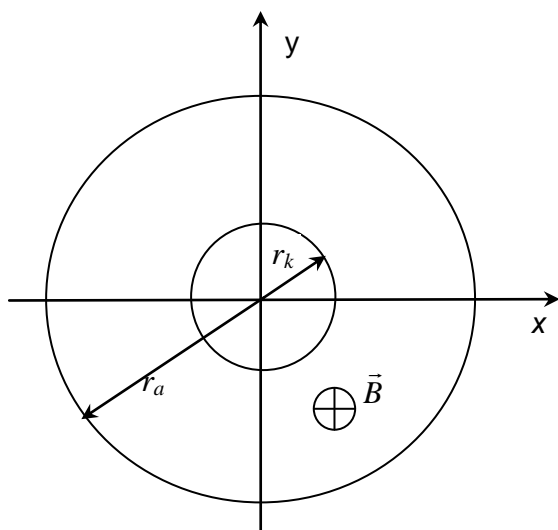


Рис. 1

Особенности движения одиночного заряда в скрещенных электрическом и магнитном полях (при неоднородном магнитном поле) рассматривались в работе [1]. Представляет интерес рассмотреть движение заряда q_1 в скрещенных полях в присутствии второго заряда q_2 , взаимодействующего с первым. Предположим, что оба заряда отрицательны и одинаковы по величине. Следовательно, они будут отталкиваться. Рассмотрим схему в скрещенных полях, аналогичную диоду с продольным (вдоль оси катода) магнитным полем и радиальным электрическим полем E_r (рис. 1).

В прямоугольной системе координат уравнения движения двух зарядов применительно к схеме на рис. 1 можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{V}_{x_1} = E_{x_1} + F_{x_{12}} + \Omega_1 V_{y_1}; \dot{V}_{x_2} = E_{x_2} + F_{x_{21}} + \Omega_2 V_{y_2} \\ \dot{x}_1 = V_{x_1}; \dot{x}_2 = V_{x_2} \\ \dot{V}_{y_1} = -\Omega_1 V_{x_1} + E_{y_1} + F_{y_{12}}; \dot{V}_{y_2} = -\Omega_2 V_{x_2} + E_{y_2} + F_{y_{21}} \\ \dot{y}_1 = V_{y_1}; \dot{y}_2 = V_{y_2} \end{cases}$$

где x_1, y_1 – координаты первого заряда в плоскости (x, y) ; x_2, y_2 – координаты второго заряда; V_{x_1}, V_{y_1} – скорость движения первого заряда; V_{x_2}, V_{y_2} – скорость движения второго заряда; Ω – циклотронная частота; E_{x_1}, E_{y_1} – составляющие напряженности радиального электрического поля E_r , действующие на первый заряд; E_{x_2}, E_{y_2} – на второй заряд.

При этом:

$$\begin{cases} E_{y_1} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)} \cdot \left[\frac{y_1}{(x_1)^2 + (y_1)^2} \right]; E_{x_1} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)} \cdot \left[\frac{x_1}{(x_1)^2 + (y_1)^2} \right] \\ E_{y_2} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)} \cdot \left[\frac{y_2}{(x_2)^2 + (y_2)^2} \right]; E_{x_2} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)} \cdot \left[\frac{x_2}{(x_2)^2 + (y_2)^2} \right], \end{cases}$$

где r_k – радиус катода; r_a – радиус анода; U_0 – величина, соответствующая потенциалу анода.

Силы $F_{x_{12}}, F_{y_{12}}$ и $F_{x_{21}}, F_{y_{21}}$ – силы электростатического взаимодействия зарядов.

Принимая, что заряды q_1 и q_2 равны 1 для сил электростатического взаимодействия, можно записать:

$$\begin{cases} F_{x_{12}} = -\frac{x_2 - x_1}{r_s^3}; F_{y_{12}} = -\frac{y_2 - y_1}{r_s^3} \\ F_{x_{21}} = \frac{x_2 - x_1}{r_s^3}; F_{y_{21}} = \frac{y_2 - y_1}{r_s^3}. \end{cases}$$

Для численного решения уравнения движения и определения величин фазовых переменных использовался неявный метод, изложенный в работе [2]. При этом принималось: $\Omega=1, U_0=1, r_k=0,5, r_a=10$, нулевые начальные скорости зарядов. Кроме того, сам катод считался «прозрачным» для движущихся зарядов, а радиальное электрическое поле внутри катода принималось равным полю на катоде. Как показали расчеты, это допущение не влияет существенно на характер карты динамических режимов в пространстве «катод-анод».

На рис. 2, 3 и 5 представлены области существования хаотических и регулярных траекторий зарядов в координатах (x, y) . Эти области («ляпуновское пространство») получены на основании расчета показателей Ляпунова (λ) и окрашены в различные оттенки серого цвета. При этом белый цвет соответствует регулярным траекториям (показатель Ляпунова меньше нуля). Градации темного цвета соответствуют различным положительным значениям показателя по мере роста его величины.

Случай, когда присутствует только один заряд, представлен на рис. 2. Видно, что практически вся область в этом случае имеет белый или светло-серый цвет, что соответствует регулярным траекториям.

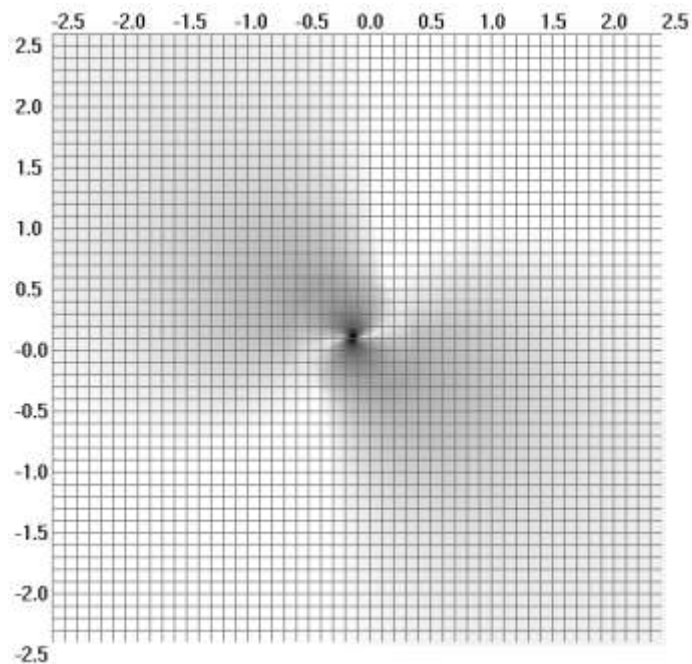


Рис. 2. Карта показателей Ляпунова в плоскости координат (x,y) в случае присутствия одного заряда. Максимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\max}=4.030364$, минимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\min}=-0.568831$

Карты динамических режимов для случаев, когда учтена сила взаимодействия двух зарядов, представлены на рис. 3, 4:

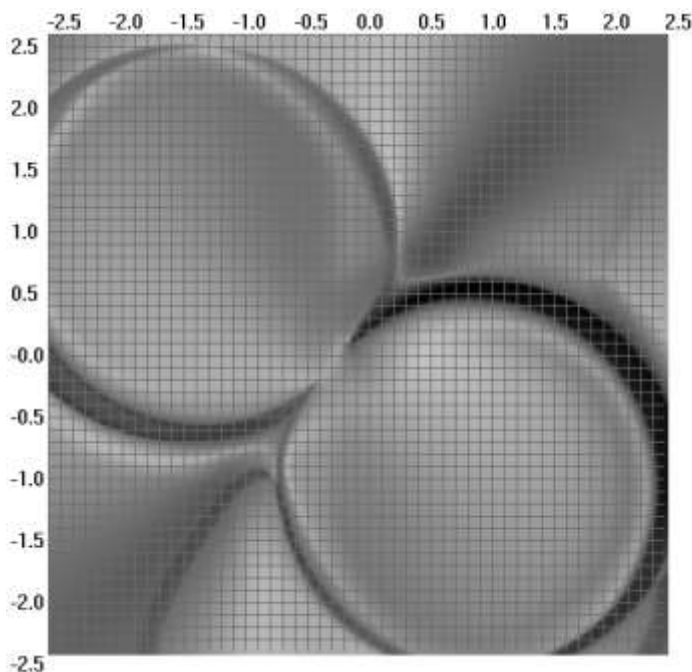


Рис. 3. Карта показателей Ляпунова в плоскости координат (x,y) .
Случай, когда из каждой точки рассматриваемой области оба заряда начинают двигаться с начальным расстоянием между ними $r_s=0.3$. Максимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\max}=3.850257$, минимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\min}=0.905390$

Для случая, когда один заряд начинает свое движение из одной и той же фиксированной точки (например, с координатами (1;1)), а другой имеет в качестве начальных координат последовательно координаты каждой точки исследуемой области, карта динамических режимов представлена на рис. 4:

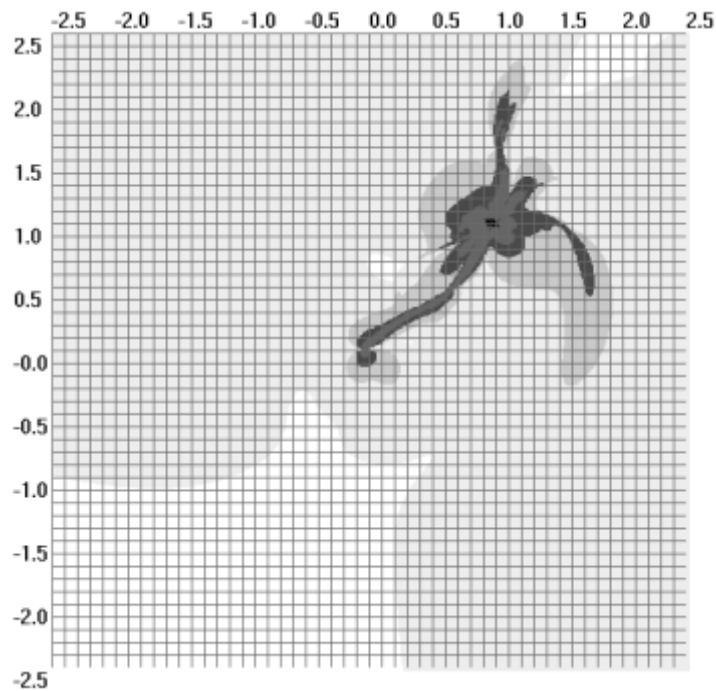


Рис. 4. Карта показателей Ляпунова в плоскости координат (x,y).
Максимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\max}=11.170605$,
минимальное значение показателя Ляпунова $\lambda_{\min}=-0.760053$

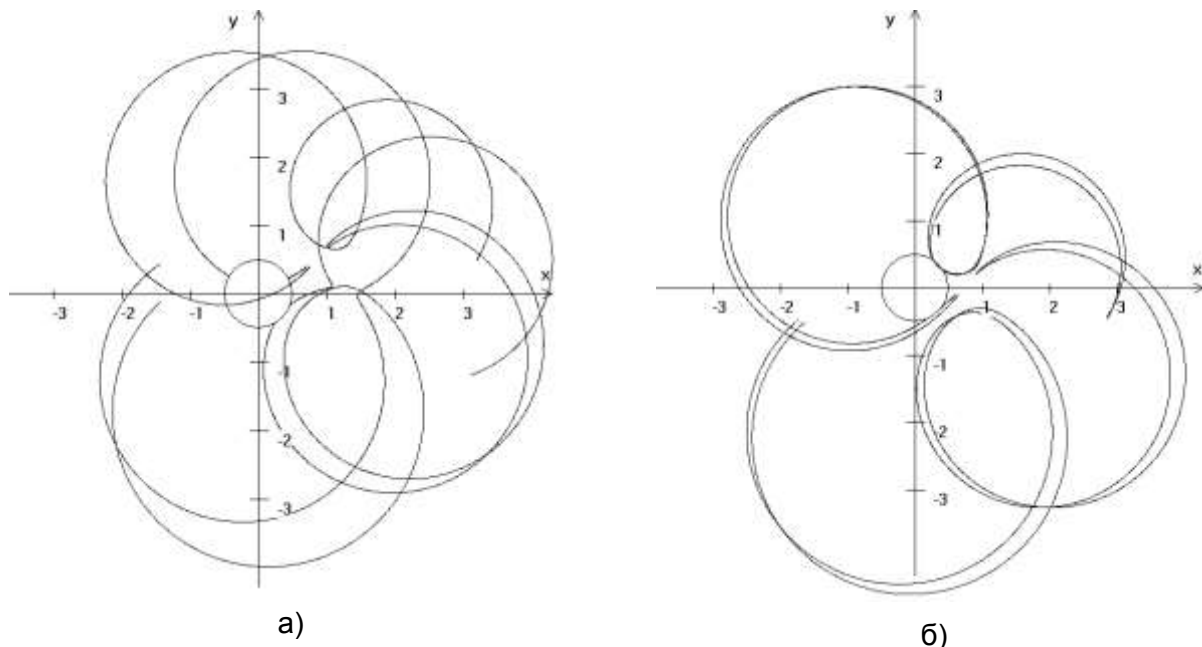


Рис. 5. Типичные траектории зарядов:
а – для области хаотических режимов $V_{0x_1} = V_{0x_2} = V_{0y_1} = V_{0y_2} = 0$, $x_{01}=0,7$, $y_{01}=0,4$;
б – для области устойчивого поведения, где $V_{0x_1} = V_{0x_2} = V_{0y_1} = V_{0y_2} = 0$, $x_{01}=0,6$, $y_{01}=-0,1$.

Светлая линия соответствует траектории движения первого заряда (первоначальная и смещенная), темная – второго

Типичный вид хаотических (рис. 5, а) и регулярных (рис. 5, б) траекторий в плоскости координат для случая взаимодействующих зарядов представлен на рис. 5. На рис. 5, а видно, что в хаотическом режиме траектории зарядов, стартующих при практически совпадающих начальных условиях, с течением времени быстро расходятся, для них показатель Ляпунова положителен.

Пример регулярных траекторий представлен на рис. 5, б, где две траектории, имеющие ту же незначительную разницу в начальных условиях, по существу, совпадают. Для них показатель Ляпунова меньше 0 или близок к 0.

Таким образом, появление второго заряда, взаимодействующего с первым, существенно меняет карту динамических режимов. Практически вся исследуемая область (рис. 3) соответствует хаотическим траекториям. Вместе с тем, если начальное положение одного из зарядов фиксировано в одной и той же точке (рис. 4), то появляется значительная часть области, соответствующая регулярным траекториям (белый или светло-серый цвета на рис. 4). Физически это понятно, так как заряд, стартующий в этой части области, еще слабо взаимодействует с другим, ввиду относительно большого расстояния между ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байбурин В.Б., Мантуров А.О., Юдин А.В. Хаотическое поведение зарядов в скрещенных полях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т.10. № 6. С.62-70.
2. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 320 с.

Байбурин Вил Бариевич –

доктор физико-математических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ, действительный член РАЕН, заведующий кафедрой
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического университета

Трачук Светлана Анатольевна –

студентка Саратовского государственного технического университета

УДК 621.317.7

А.А. Львов, В.А. Пыльский

ЛИНЕЙНАЯ ПЕТЛЕВАЯ СХЕМА ТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ

В статье представлена принципиально новая схема формирования сигнала пассивных датчиков – «токовая петля». Подробно изложены принципы функционирования и преимущества перед традиционными мостовыми схемами. Схема является универсальной и может работать с датчиками с любым импедансом. Даны рекомендации по практической реализации «токовой петли» средствами как аналоговой, так и цифровой микропроцессорной техники с применением методов статистической обработки сигналов.

А.А. Lvov, V.A. Pilsky

LINEAR LOOP SCHEME OF EXACT PROCESSING OF TRANSMITTERS SIGNALS

A new fundamental circuit for transducer signal conditioning – “current loop” – is presented in the paper. Basic operating principles as well as advantages of this circuit over conventional bridge circuits described. Suggested general-purpose circuit can be used with transducers having arbitrary impedances. Implementation in practice of “current loop” in combination with statistical signal processing using analog circuits and/or digital microprocessors.

Недостатки мостовых схем включения пассивных датчиков

В течение долгого времени в качестве основных формирователей сигналов пассивных (параметрических) датчиков в системах сбора и обработки информации используются мостовые схемы. Они позволяют легко обеспечить питание датчика, исключить постоянную составляющую измеряемого напряжения. Их конструкция проста и не требует применения полупроводниковых приборов или интегральных микросхем. Кроме того, они не критичны к используемому регистрирующему прибору. Так, например, в мостах постоянного тока часто применяют простейшие гальванометры, а в мостах переменного тока – головные телефоны (наушники).

Но, несмотря на эти достоинства, мостовые схемы не могут претендовать на роль прецизионного формирователя сигнала пассивного датчика ввиду нескольких своих недостатков [1]. Наиболее существенными будем считать нелинейность, ограничения по чувствительности (коэффициенту усиления), чувствительность к длине соединительных проводов, сложности в реализации автоматического измерительного устройства. Рассмотрим классический мост постоянного тока для работы с датчиками с чисто активным импедансом – мост Уитстона (рис. 1).

На рисунке $R_D = R_{D0} + \Delta R_D$ – сопротивление датчика (состоит из его начального импеданса R_{D0} и рабочего изменения ΔR_D), R_V – сопротивление регистрирующего прибора V , $U_{ИПТ} = U_{ИП0} + \Delta U_{ИП}$ (где $\Delta U_{ИП}$ – флуктуации напряжения источника питания), $R_{ИП}$ – внутреннее сопротивление источника питания. Условие баланса имеет вид: $R_1 R_4 = R_2 R_3$. При этом напряжения в точках А и В равны, а ток в диагонали АВ $i_{AB} = 0$.

По уравнениям Кирхгофа можно определить выражение напряжения разбаланса U_{AB} , как функцию сопротивлений плеч и параметров источника напряжения. Однако это выражение даже для случая постоянного тока имеет очень громоздкий вид, и поэтому для упрощения принимают сопротивления плеч моста одинаковыми: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, а сопротивлением $R_{ИП}$ пренебрегают. Можно показать, что в этом случае:

$$U_{AB} = \frac{U_{ИП}}{4} \frac{\Delta R_D}{R_{D0}} \frac{1}{1 + \Delta R_D / 2R_{D0}}.$$

Легко видно, что функция нелинейна относительно интересующего исследователя рабочего изменения параметра датчика ΔR_D . Для моста, используемого в комплекте с магази-

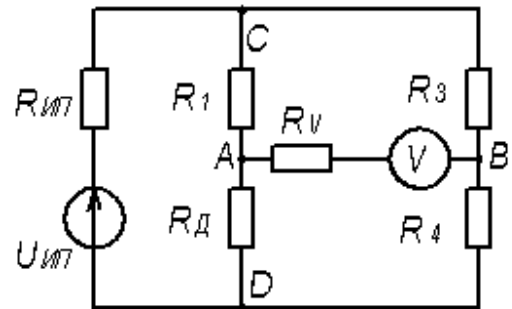


Рис. 1. Мост Уитстона

ном эталонных сопротивлений для измерения мгновенного значения параметра (например, при выяснении сопротивления резистора), это не является преградой. Однако в автоматизированных системах сбора и обработки информации требуется непрерывное слежение за изменением рабочего параметра датчика, и именно здесь нелинейность функции $U_{AB}(\Delta R_D)$ проявляется, как недостаток.

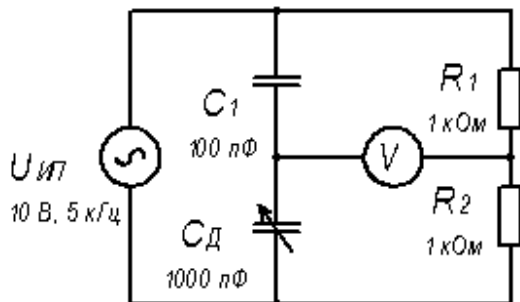


Рис. 2. Мост Саути для измерения емкостей

Для демонстрации этого факта авторами был собран мост Саути, применяемый для измерения емкостей (рис. 2), и снята его характеристика $U_{ВЫХ}(\Delta C_D)$ (рис. 3).

Существует несколько технических приемов линейризации этой характеристики. Один из них – работа на линейном участке в окрестности состояния равновесия (см. рис. 3). Однако это сразу сужает наблюдаемый диапазон изменения выходного параметра датчика. Другой прием – дифференциальное включение датчиков, – заключается в применении 4 датчиков (в каждом плече моста) вместо одного, что делает конструкцию более громоздкой, дорогой (зачастую основная доля стоимости измерителя принадлежит точному первичному преобразователю) и подверженной влиянию помех.

стую основная доля стоимости измерителя принадлежит точному первичному преобразователю) и подверженной влиянию помех.

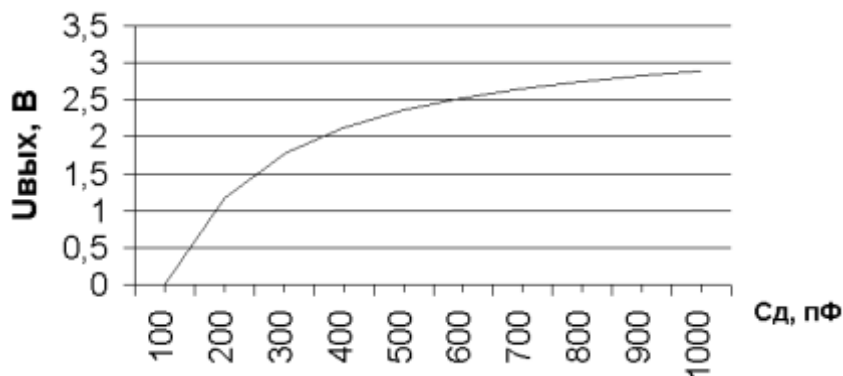


Рис. 3. Экспериментально полученная характеристика $U_{ВЫХ}(\Delta C_D)$ моста Саути

Ограничения по чувствительности выражаются в том, что для ее повышения в k раз требуется примерно в это же число раз (см. выражение для U_{AB}) повысить напряжение источника питания, что, во-первых, не всегда возможно, а во-вторых, потребует применения элементов и соединителей с большим рабочим напряжением. Поэтому для повышения чувствительности в 2 раза приходится применять два одинаковых датчика, включенных в соседние плечи моста. Это, как и в предыдущем случае, усложняет и повышает стоимость конструкции. К тому же это решение лишено какой-либо гибкости.

Иногда среди достоинств мостовой схемы отмечают ее нечувствительность в состоянии равновесия к флуктуациям $\Delta U_{ИП}$ напряжения источника питания. Действительно, можно показать, что при $i_{AB}=0$ напряжение U_{AB} не зависит от $\Delta U_{ИП}$ при условии $R_{ДО} \gg \Delta R_D$. Однако выполнение этого условия снижает чувствительность моста к изменению ΔR_D . Более того, нас интересует не состояние равновесия, а работа в его окрестности на линейном участке характеристики, где мост чувствителен к $\Delta U_{ИП}$.

Когда датчик расположен на значительном расстоянии от мостовой схемы, то сопротивлением подводящих проводов $R_{\text{Д}}$ пренебрегать нельзя, так как вариации этого сопротивления под воздействием факторов внешней среды накладываются на вариации параметра датчика. Поэтому для уменьшения (но не полного исключения) влияния соединительных проводов применяют схемы с подключением одного датчика посредством 3 и даже 4 проводов, при этом ставятся условия максимальной близости параметров и минимального собственного сопротивления этих проводов. Очевидно, что такое решение неудобно в своем применении.

Следует также отметить, что в практике измерений иногда требуется иметь измерительное устройство, способное работать со всем спектром датчиков – с чисто активным (резистивным), чисто реактивным (емкостным и индуктивным) и смешанным импедансами. Мостовая схема позволяет работать с каждым из этих датчиков, но для каждого случая требуется своя модификация (мосты Уитстона, Нернста, Саути, Максвелла, Гэя). Это затрудняет создание универсального автоматического измерителя на базе мостовой схемы.

Альтернатива измерительному мосту – «токовая петля»

Предлагается устройство формирования и обработки сигнала пассивных датчиков – «токовая петля», – свободное от всех описанных в предыдущем пункте недостатков, присущих мостовым схемам. Структурная схема «токовой петли» (ТП) представлена на рис. 4.

ТП представляет собой замкнутую цепь, в которую последовательно включены датчик с импедансом $Z_{\text{Д}}=Z_{\text{Д0}}+\Delta Z_{\text{Д}}$ (состоит из его начального импеданса $Z_{\text{Д0}}$ и рабочего изменения выходного параметра $\Delta Z_{\text{Д}}$), некоторого опорного импеданса $Z_{\text{ОП}}$ и источника тока (в общем случае – переменного) $I_{\text{ИТ}}$. Соединительные провода представлены импедансами $Z_{\text{ПР1}}$ и $Z_{\text{ПР2}}$.

В подавляющем большинстве случаев $Z_{\text{ПР1}}=Z_{\text{ПР2}}=Z_{\text{ПР}}$. С датчика $Z_{\text{Д}}$ и опорного импеданса $Z_{\text{ОП}}$ снимаются падения напряжения $U_{\text{Д}}$ и $U_{\text{ОП}}$ соответственно, которые обусловлены протеканием по этим элементам тока $I_{\text{ИТ}}$, и подаются на схему двойного дифференциального усилителя (далее – ДДУ). ДДУ осуществляет вычитание двух дифференциальных сигналов согласно выражению:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k_1 U_{\text{Д}} - k_2 U_{\text{ОП}} = k_1 [I_{\text{ИТ}} (R_{\text{Д0}} + \Delta R_{\text{Д}})] - k_2 [I_{\text{ИТ}} R_{\text{Д0}}].$$

При конструировании ДДУ легко осуществить условие $k_1=k_2=K$ (одинаковое усиление по обоим каналам). Если при этом выбрать $Z_{\text{ОП}}=Z_{\text{Д0}}$, то из предыдущего выражения следует:

$$U_{\text{ВЫХ}} = KI_{\text{ИТ}} \Delta R_{\text{Д}}.$$

Выражение демонстрирует линейность зависимости выходного напряжения схемы от изменения рабочего параметра датчика. Однако в выражении присутствует коэффициент K , объединяющий в себе характеристики элементов ДДУ и способный внести негативные последствия в работу схемы, в том числе и нелинейность. Поэтому при конструировании ДДУ следует применять интегральные операционные усилители (ОУ), нелинейность которых, лежащая для современных моделей в диапазоне от сотых до тысячных долей процента [2], пре-

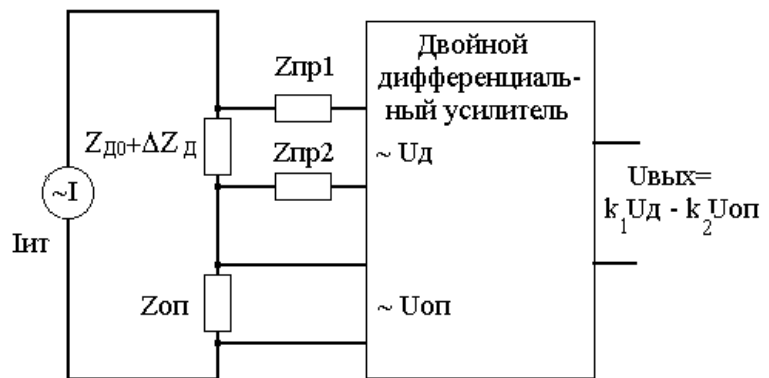


Рис. 4. Структурная схема «токовой петли»

небрежимо мала. К тому же применение ОУ, благодаря простоте конструкции базирующихся на них типовых функциональных узлов, облегчает реализацию ДДУ.

Схема обладает повышенной помехоустойчивостью, так как все наведенные в датчике и соединительных проводах помехи взаимно подавляются вычитанием в дифференциальном каскаде ДДУ. А благодаря применению источника тока и этому же дифференциальному каскаду схема нечувствительна к длине соединительных проводов. Это происходит потому, что падения напряжения на проводах с одинаковыми параметрами $Z_{ПР}$ так же одинаковы, как и изменения их под воздействием факторов внешней среды. Вычитание этих падений в ДДУ приводит к их взаимной нейтрализации (приведенное выше выражение для $U_{ВЫХ}$ не зависит от $Z_{ПР}$). Длина соединительных проводов в основном ограничена только мощностью источника тока.

Применение источника тока (а не источника напряжения) имеет еще одну положительную сторону – его высокое внутреннее сопротивление не вносит корректив в работу ТП.

Ранее было отмечено, что наиболее удобно работать с ТП при выполнении условия $Z_{ОП}=Z_{ДО}$. Это условие можно выполнить на этапе разработки путем выяснения значения $Z_{ДО}$ конкретного датчика в документации или экспериментальным путем. Затем на этапе отладки устройства путем подстройки $Z_{ОП}$ производится окончательная доводка, при этом критерием точной реализации $Z_{ОП}=Z_{ДО}$ будет служить нулевое значение выходного напряжения $U_{ВЫХ}$. Если настройка на этих этапах осуществлена с достаточной точностью, то схема ТП приобретает еще одну существенную возможность – измерение малых отклонений рабочего параметра датчика.

Схема ТП обладает высокой гибкостью и легко адаптируется как для конкретных случаев измерений и съема информации, так и для универсального применения с различными типами датчиков. Благодаря применению типовых функциональных узлов на ОУ в каскадах ДДУ чувствительность (коэффициент усиления) всей схемы может легко варьироваться.

Если для ТП применять источник постоянного тока, то схема становится ориентированной только на резистивные (с активным импедансом) датчики, но конструкция ДДУ существенно упрощается. Если источник генерирует переменный ток, то, как будет показано ниже, схема становится универсальной и без каких-либо изменений способна работать с датчиками с активным (резистивным), реактивным (емкостным и индуктивным) и смешанным импедансами. В этом случае ДДУ должен быть фазочувствительным.

ТП предоставляет возможность подавления не только помех, наводимых в идущих от датчика проводах, но и компенсации влияния факторов окружающей среды, оказываемого на сам датчик. При этом в качестве опорного элемента $Z_{ОП}$ необходимо применить датчик, аналогичный используемому непосредственно для измерения ($Z_{Д}$), и разместить их в непосредственной близости. При этом образуется стандартная дифференциальная схема, в которой окружающая среда одинаково действует на оба датчика и возникающие помехи самоликвидируются вычитанием в ДДУ. Следует отметить тот очевидный факт, что опорный датчик не должен находиться под воздействием измеряемого процесса. При реализации такого варианта ТП некоторые изменения претерпят источник тока и ДДУ (см. ниже).

Авторами был сконструирован и исследован экспериментальный вариант универсальной схемы ТП с источником переменного тока, детали конструкции которого будут освещены ниже. В качестве модели датчика был использован магазин емкостей. На рис. 5 представлена экспериментально полученная зависимость $U_{ВЫХ}(\Delta C_{Д})$. В эксперименте были приняты величины $C_{ОП}=C_{ДО}=10$ нФ, изменения емкости датчика $\Delta C_{Д}=0\div 100$ пФ, т.е. эти величины отличались более чем на два порядка.

График демонстрирует, что схема действительно способна отслеживать малые (относительно начальной емкости $C_{ДО}$) изменения рабочего параметра датчика, обладая при этом хорошей линейностью.

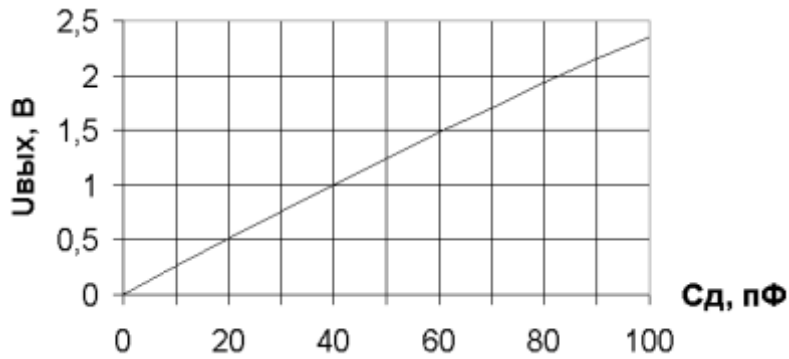


Рис. 5. Экспериментально полученная для ТП зависимость $U_{\text{вых}}(\Delta C_{\text{д}})$

Особенности построения петли и источника тока

Рассмотрим особенности реализации и функционирования универсальной (по отношению к различным типам датчиков) ТП на примере схемы обработки сигнала емкостного датчика.

Основные вариации в конструкции петлевого участка и генератора тока связаны с режимом работы ТП – с компенсацией влияния факторов окружающей среды на датчик и без нее (см. предыдущий пункт). Схема петлевого участка при отсутствии компенсации представлена на рис. 6. С датчика снимается дифференциальный сигнал, с опорного элемента – сигнал относительно «земли».

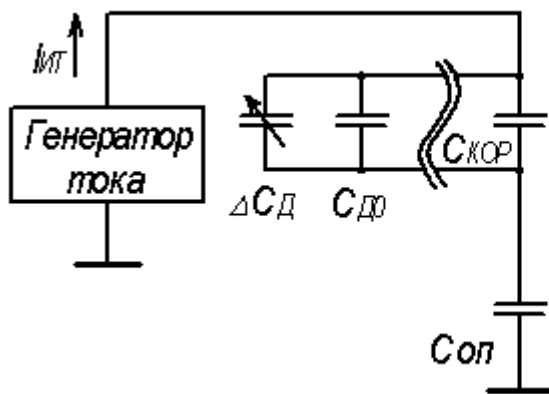


Рис. 6. Схема петлевого участка при отсутствии компенсации

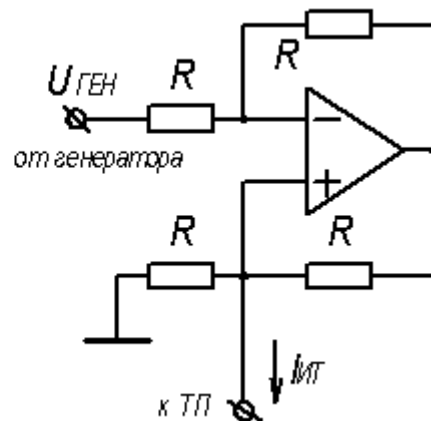


Рис. 7. Заземленный биполярный преобразователь «напряжение – ток»

При использовании узлов на ОУ генератор переменного тока удобно реализовать в виде преобразователя «напряжение – ток», входным сигналом для которого является выход какого-либо синусоидального генератора. Частота генератора должна быть выбрана в соответствии со следующими требованиями: она должна быть достаточно велика по сравнению с частотой изменения рабочего параметра датчика (что позволит затем в ДДУ качественно отфильтровать ее), но настолько велика, чтобы проявилось влияние межпроводниковых и внутрисхемных паразитных емкостей. В экспериментальном образце была выбрана частота 5 кГц.

Ввиду того, что необходимо получить переменный ток, преобразователь «напряжение – ток» должен быть биполярным. Как следует из рис. 3, при отсутствии компенсации (когда опорный элемент находится на плате схемы ТП), он также должен быть и заземленным (иметь общую «землю» с остальными элементами ТП). Схема одного из преобразователей, отвечающих этим требованиям, приведена на рис. 7. Он обладает бесконечным выходным сопротивлением, а величина вырабатываемого им тока определяется выражением:

$$I_{ИТ} = -U_{ГЕН} / R.$$

Корректирующий конденсатор $C_{КОР}$ обеспечивает нормальную работу преобразователя «напряжение – ток» и рассчитывается, исходя из диапазона генерируемого им тока конкретной выбранной частоты. Это связано с тем, что зачастую собственный импеданс датчика $C_{Д}$ имеет небольшое значение (сотни пикофард), и преобразователь ввиду ограниченности его мощности не сможет обеспечить протекание по цепи тока требуемой величины. При этом емкость опорного элемента $C_{ОП}$ необходимо рассчитывать по формуле $C_{ОП} = C_{ДО} + C_{КОР}$.

Схема петлевого участка ТП при наличии компенсации влияния внешней среды приведена на рис. 8. При этом опорный элемент (обычно датчик, аналогичный рабочему) размещается в непосредственной близости от $C_{Д}$. И с датчика, и с опорного элемента снимаются дифференциальные сигналы. Поэтому преобразователь «напряжение – ток» должен быть незаземленным. Простейший вариант такого преобразователя представлен на рис. 9. Величина вырабатываемого им тока определяется выражением:

$$I_{ИТ} = U_{ГЕН} / R.$$

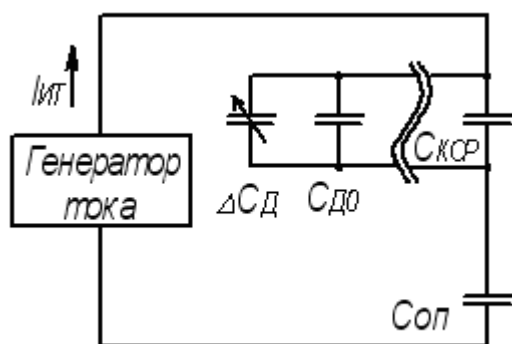


Рис. 8. Схема петлевого участка при наличии компенсации

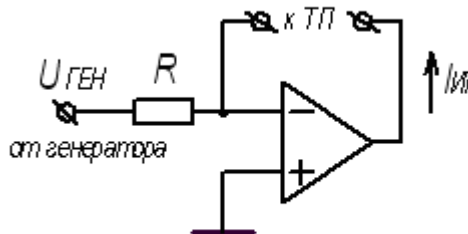


Рис. 9. Незаземленный биполярный преобразователь «напряжение – ток»

Схема ТП не критична к стабильности амплитуды генерируемого источником тока только в том случае, когда коэффициент усиления ДДУ $K=1$. Так как эта ситуация почти не встречается в практике организации измерений, то требуется применять стабильный по амплитуде синусоидальный генератор.

Аналоговый двойной дифференциальный усилитель (ДДУ)

В зависимости от применяемой базы электронных компонентов и конкретной измерительной задачи, ДДУ может быть реализован аналоговым и цифровым способами. Функциональная схема аналогового фазочувствительного (для ТП переменного тока) ДДУ приведена на рис. 10.

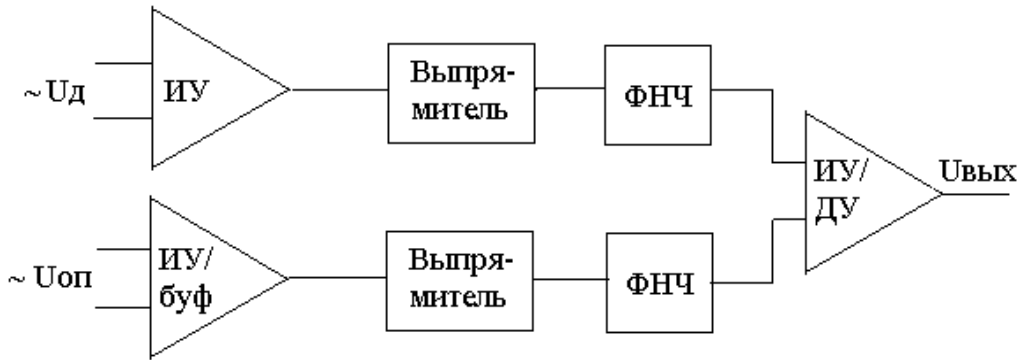


Рис. 10. Функциональная схема аналогового фазочувствительного ДДУ

Дифференциальный сигнал U_d , снимаемый с датчика, должен быть обработан дифференциальным инструментальным (измерительным) усилителем ИУ – каскадом повышенной точности и имеющим максимальную развязку с источником сигнала. Один из вариантов с единичным коэффициентом усиления приведен на рис. 11. Также можно использовать готовые инструментальные интегральные усилители, например, серии INA фирмы Burr Brown [1].

Сигнал $U_{оп}$ с опорного элемента либо должен обрабатываться таким же инструментальным усилителем, если $C_{оп}$ находится в точке измерения (около датчика – вариант с компенсацией влияния факторов внешней среды), либо должен подаваться для дальнейшей обработки через буферный каскад, если $C_{оп}$ находится на плате схемы обработки информации и сигнал снимается с него относительно земли.

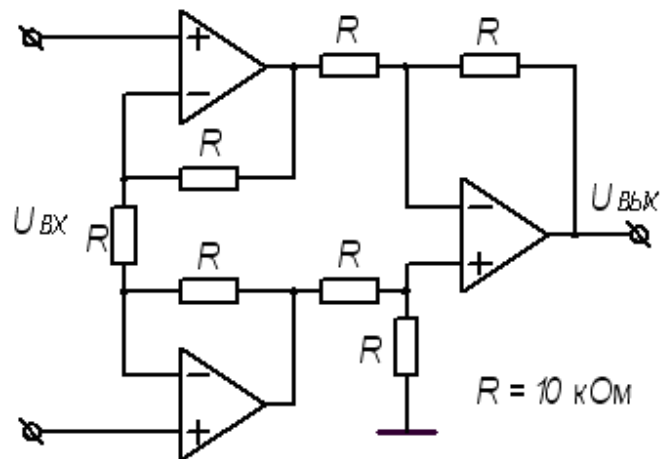


Рис. 11. Инструментальный усилитель с единичным усилением

Далее оба сигнала, подготовленные описанным способом, должны быть поданы на две цепочки, состоящие из детектора (выпрямителя) и фильтра. В этих цепях происходит подавление (фильтрация) несущей частоты источника переменного тока и выделение полезного сигнала, пропорционального снятым напряжениям U_d , $U_{оп}$. Оба узла – выпрямитель и фильтр – легко реализуются на операционных усилителях. Выпрямитель может быть применен или однополупериодный (что упростит его конструкцию), или двухполупериодный (что повысит чувствительность схемы). ФНЧ должен надежно подавлять несущую частоту источника тока и пропускать низкочастотный сигнал изменения рабочего параметра датчика. В экспериментальном устройстве был применен фильтр Чебышева второго порядка с частотой среза 500 Гц и подавлением на частоте 5 кГц (частоте источника тока) –40 дБ.

Затем два полученных полезных сигнала подаются для вычитания на дифференциальный усилитель ДУ (который может быть либо простейшим, либо инструментальным – в зависимости от требуемой точности). Коэффициентом усиления этого каскада удобно регулировать чувствительность всей схемы ТП.

Благодаря наличию фильтров результат вычитания в последнем дифференциальном каскаде ДДУ не зависит от разности фаз сигналов U_d и $U_{оп}$. Как следствие, фазочувствительный ДДУ делает схему универсальной: как датчик, так и опорный элемент могут быть любыми по характеру импеданса (резистивные, емкостные, индуктивные и смешанные). При этом условие $Z_{оп} = Z_{до}$ должно выполняться на выбранной частоте генератора тока. Простейший вариант – применение в качестве опорного элемента резистора.

При реализации ТП для резистивных датчиков из схемы ДДУ исключаются выпрямители и фильтры.

Цифровой двойной дифференциальный усилитель (ДДУ)

Топология схемы ТП позволяет уменьшить влияние наводимых в датчике и соединительных проводах помех, скомпенсировать влияние факторов окружающей среды, обеспечить независимость от длины соединительных проводов. Однако точность работы самой схемы во многом определяется точностью элементов (в основном ОУ), применяемых в ней. При аналоговой реализации ДДУ желательно применение точных ОУ, что удорожает схему. Также на точных элементах должен быть построен генератор тока. Стремление применить более дешевые электронные компоненты без потери общей точности схемы ТП приводит к необходимости использования статистической обработки результатов измерения средствами цифровой микропроцессорной техники.

Наиболее простым вариантом является подача выходного сигнала аналогового ДДУ (рис. 10) на АЦП, а затем в цифровом виде – на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Однако более рационально и функции самого ДДУ переложить на цифровое микропроцессорное устройство. При этом алгоритмическая реализация ДДУ будет гораздо проще, так как функции выпрямителя и фильтра можно заменить простым детектированием и совмещением фаз входных сигналов. Функциональная схема цифрового ДДУ представлена на рис. 12.

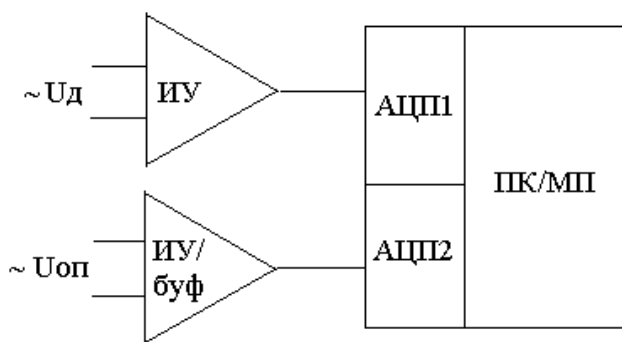


Рис. 12. Функциональная схема цифрового ДДУ

Входные каскады такие же, как и в аналоговом варианте. Буферизованные ими сигналы от датчика и опорного элемента оцифровываются двумя АЦП и подаются для дальнейшей обработки в персональный компьютер ПК. Однако ПК имеет ограниченные возможности подачи нескольких сигналов и обладает значительными габаритами и энергопотреблением. Более рациональным вариантом при создании компактной автоматической системы сбора информации является применение современного микроконтроллера (МК) с встроенным двухканальным АЦП.

Микропроцессорная обработка измерительной информации позволяет использовать большее число измерений, а результат получать с помощью оптимальных статистических методов оценивания неизвестных параметров. Очевидно, что увеличение числа измерений в одной выборке ведет к более точным измерениям. Однако это требует большей тактовой частоты аналого-цифрового преобразователя (АЦП), большего объема памяти и повышает аппаратные затраты. Поэтому, помимо увеличения количества измерений, можно повышать точность оцениваемых величин за счет оптимального выбора состава измерений, основываясь на результатах теории планирования экспериментов [4].

В идеале петлевой ток, формируемый генератором, имеет вид $I_{IT} = I \sin \omega t$. Тогда с выхода формирователя сигнала после АЦП на микропроцессорную систему подается сигнал, дискретизованный по времени

$$x_i = x(t_i) = A \sin[(\omega + \Delta\omega)t_i + \varphi] + A_0 + \xi_i \quad (i = \overline{1, N}), \quad (1)$$

где A – амплитудное значение петлевого тока, несущее полезную информацию с датчика; ω – круговая частота, задаваемая генератором; $\Delta\omega$ – неизвестная модуляционная составляющая, обусловленная нестабильностью генератора тока; φ – неизвестная фаза смещения; A_0 – паразитная постоянная составляющая, вызванная плаванием напряжений операционных усилителей; ξ – дополнительные шумы согласующих усилителей АЦП, распределенные по закону Гаусса с неизвестной дисперсией; N – количество измерений в выборке.

Будем предполагать, что $|\Delta\omega| \ll \omega$, то есть модуляционная составляющая из-за нестабильности частоты генератора изменяется достаточно медленно и на некотором интервале времени ее можно считать постоянной величиной. Тогда из (1), в котором интерес представляет только амплитуда A , несложно получить:

$$x_i \approx A \sin \omega t_i \cos \varphi + A \Delta\omega t_i \cos \omega t_i \cos \varphi + A \cos \omega t_i \sin \varphi - A \Delta\omega t_i \sin \omega t_i \sin \varphi + A_0 + \xi_i.$$

Вводя следующие обозначения,

$$\begin{cases} q_1 = A \cos \varphi, q_2 = A \sin \varphi, q_3 = A \Delta\omega \cos \varphi, q_4 = A \Delta\omega \sin \varphi, q_5 = A_0, \\ y_{1i} = \sin \omega t_i, y_{2i} = \cos \omega t_i, y_{3i} = t_i \cos \omega t_i, y_{4i} = -t_i \sin \omega t_i, y_{5i} = 1, (i = \overline{1, N}), \end{cases} \quad (2)$$

получаем линейную систему уравнений относительно новых переменных q_1, \dots, q_5

$$x_i = y_{1i}q_1 + y_{2i}q_2 + y_{3i}q_3 + y_{4i}q_4 + q_5 + \xi_i, \text{ или в матричном виде } \mathbf{X} = \mathbf{YQ}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{21} & y_{31} & y_{41} & 1 \\ y_{12} & y_{22} & y_{32} & y_{42} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1N} & y_{2N} & y_{3N} & y_{4N} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix}.$$

Из (2) видно, что часть новых переменных связаны между собой квадратичной зависимостью

$$q_1q_4 - q_2q_3 = 0. \quad (4)$$

Поэтому решение системы (3) по методу наименьших квадратов с учетом ограничения (4) получается из итерационных соотношений [3]:

$$\mathbf{q}^{(m+1)} = \mathbf{q}^{(m)} - \frac{\mathbf{q}^{(m)T} \mathbf{G} \mathbf{q}^{(m)}}{2\mathbf{q}^{(m)T} \mathbf{G}^T (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{q}^{(m)}} (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{q}^{(m)} \quad (5)$$

$$\mathbf{q}^{(0)} = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} (\mathbf{Y}^T \mathbf{X}), \quad (6)$$

где \mathbf{G} – матрица квадратичной формы (4).

После нахождения оценок промежуточных неизвестных с помощью алгоритма (5), (6) оценка искомой амплитуды A , интересующей исследователя, может быть легко получена из выражения $\hat{A} = \sqrt{\hat{\epsilon}_1^2 + \hat{\epsilon}_2^2}$. Более того, если используется в схеме достаточно производительный вычислитель, способный проводить вычисления (5)-(6) в реальном времени, то можно существенно снизить требования к стабильности генератора тока. Действительно, получив оценки q_1, \dots, q_5 ,

можно вычислить и оценку модуляционной составляющей $\Delta\omega = \sqrt{(\epsilon_3^2 + \epsilon_4^2)/(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)}$, и в следующей серии из N измерений использовать уточненное значение частоты $\omega + \Delta\omega$. Поскольку у реальных генераторов стабильность частоты бывает не хуже $\pm 1\%$, то все предположения о малости $\Delta\omega$ по сравнению с основной частотой справедливы.

Существует другая возможность упрощения состава используемого оборудования, которая, наоборот, требует наличия высокостабильного генератора тока, но за счет точного знания частоты генерации можно использовать менее производительные вычислительные средства. Если $|\Delta\omega|=0$, то параметры $q_3=q_4=0$, и размерности матрицы Y и вектора q сокращаются, уравнение связи (4) пропадает, что позволяет находить оценки оставшихся трех компонент вектора q непосредственно из (6). В работе [4] показано, что если выбрать частоту дискретизации АЦП так, чтобы время между соседними измерениями было равно $\Delta\tau = \frac{2\pi k}{N\omega}$, где k – любое целое число, выбираемое так, чтобы число измерений N в выборке не было кратным $2k$, то матрица $(Y^T Y)^{-1}$ становится диагональной, и все вычисления существенно упрощаются. Такой выбор соответствует D-оптимальному плану проведения эксперимента [4].

Понятно, что для построения D-оптимального эксперимента нужно выбирать частоту дискретизации АЦП $f_0 = \frac{1}{\Delta\tau}$ пропорциональной рабочей частоте генератора $f = \frac{\omega}{2\pi}$ и числу измерений в выборке N . Как известно [1], частота f задается в пределах нескольких килогерц, что позволяет эффективно использовать преимущества петлевой схемы. В этом случае при числе измерений в выборке порядка 10–20 частота дискретизации АЦП f_0 может оказаться достаточно большой. Однако, подбирая подходящее значение числа k , можно снизить эту частоту, сохранив достаточное количество измерений в выборке. Частоту дискретизации следует выбирать в пределах $f_0 \approx 10$ кГц, что позволит использовать распространенные недорогие АЦП. При этом время измерения получается в пределах нескольких миллисекунд, что позволяет проводить измерения в реальном времени.

При выборе частоты дискретизации АЦП в соответствии с указанной выше, когда она напрямую зависит от частоты генератора f , точность измерительной системы определяется, главным образом, точностью генератора петлевого тока. Поэтому использование цифровой обработки измерительных данных в соответствии с (5)-(6) позволяет отказаться от применения прецизионных операционных усилителей и резисторов в ДДУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем: Пер. с франц. М.: Мир, 1992. 230 с.
2. Применение интегральных схем / Пер. с англ.; Под ред. А. Уильямса. М.: Мир, 1987. 302 с.
3. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 216 с.
4. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука, 1983. 280 с.

Львов Алексей Арленович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

Пыльский Виктор Александрович –
студент Саратовского государственного технического университета

УДК 621.382.323+621.3.049.77.029.64

В.К. Сивяков, А.А. Гурьянов, Д.Б. Сивяков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОЩНЫХ СВЧ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ В МНОГОЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ

Разработана математическая модель мощных ПТШ на основе GaAs для расчета многочастотных режимов работы в системах автоматизированного проектирования. Модель учитывает влияние эффекта саморазогрева на характеристики транзистора. Предложена методика идентификации параметров модели. Показано, что модель позволяет адекватно рассчитывать режимы работы ПТШ, в том числе интермодуляционные искажения до 5-го порядка включительно. Моделирование выполнялось с использованием пакета программ OrCAD 9.1.

В.К. Sivyakov, А.А. Gurjyanov, D.B. Sivyakov

MATHEMATICAL GAAS POWER MESFET CAD MODEL FOR MULTIFREQUENCY OPERATION

Mathematical GaAs power MESFET CAD model for multifrequency operation is developed in this article. The model considers the influence of the self-heating effect on the device characteristics. The model identification procedure is offered here and also shown that the model allows adequately calculate operation modes of MESFET including intermodulation products inclusive 5th order. Simulation was performed using OrCAD 9.1 software package.

Полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ) на основе арсенида галлия являются основными активными элементами современных электронных устройств, с помощью которых осуществляется усиление и преобразование сигналов в гибридных и монолитных интегральных схемах СВЧ. Мощные СВЧ полевые транзисторы более компактны и менее трудоемки в производстве по сравнению с вакуумными приборами, поэтому они перспективны для создания сверхвысокочастотных устройств среднего и большого уровней мощности, применяемых в радиолокации, связи, телевидении и других СВЧ системах.

Широкое применение ПТШ на основе GaAs в быстроразвивающейся твердотельной СВЧ электронике потребовало разработки соответствующих математических моделей, адекватно описывающих его свойства. А поскольку работа усилительного прибора в составе мощных устройств предполагает наличие существенно нелинейного режима, то для расчета как одночастотных, так и многочастотных режимов работы необходим максимально полный учет нелинейных свойств транзистора в его модели.

Анализ известных математических моделей ПТШ показывает, что, несмотря на их многообразие, только некоторые из них удовлетворяют требованиям моделирования много-

частотных режимов работы электронных устройств (модели Куртиса [1], Мааса [2], В.А. Балдина [3], Б.К. Сивякова [4], Хиросе [5]). В этих моделях используются полиномы третьей или пятой степени для аппроксимации передаточной характеристики, что позволяет анализировать с их помощью интермодуляционные искажения (ИМИ) до 3-го порядка включительно. Для адекватного моделирования искажений более высоких порядков такие модели недостаточны ввиду низкой степени применяемого полинома. Кроме того, они малопригодны для описания ПТШ средней и большой мощности, поскольку в них не учитывается эффект саморазогрева канала за счет выделяемой в нем мощности, влияние которого особенно сильно проявляется в мощных ПТШ [6].

Целью работы была разработка математической модели мощных ПТШ с учетом эффекта саморазогрева и моделирование с ее помощью многочастотных режимов работы электронных устройств в системах автоматизированного проектирования.

Для расчета нелинейных искажений до 5-го порядка включительно предложена модель нелинейного источника тока стока, использующая полином 7-й степени, в которую введены температурные зависимости параметров для учета эффекта саморазогрева [7]:

$$I_d = I_{dss}(T) \left[\sum_{k=2}^7 \beta_k \left(\frac{U_T(T) - U_g}{U_T(T) - \phi_{bi}(T) + \gamma U_d} \right)^k \right] \cdot th \frac{\alpha U_d}{\lambda U_g - U_T(T) + \phi_{bi}(T) - \gamma U_d}, \quad (1)$$

где U_g , U_d – напряжения на затворе и стоке транзистора, соответственно; I_{dss} – ток насыщения; U_T – напряжение отсечки; ϕ_{bi} – потенциал барьера Шотки; α , β_k , γ , λ – коэффициенты; T – температура канала транзистора. Температурные зависимости тока насыщения, высоты барьера Шотки и напряжения отсечки введены в модель для учета влияния эффекта саморазогрева на характеристики транзистора [7]:

$$I_{dss}(T) = I_{dss0}(1 - \alpha_I T), \quad (2)$$

$$U_T(T) = U_{T0} + K_{VT}(T - T_\mu), \quad (3)$$

$$\phi_{bi}(T) = \phi_{bi0} + F_{bi}(T - T_\mu), \quad (4)$$

где I_{dss0} – ток насыщения при температуре 300 К; α_I – коэффициент изменения тока насыщения с температурой; U_{T0} , ϕ_{bi0} – соответственно напряжение отсечки и потенциал барьера Шотки при температуре $T_\mu=300$ К; K_{VT} , F_{bi} – коэффициенты, характеризующие чувствительность напряжения отсечки и потенциала барьера Шотки к изменению температуры.

Для определения температуры канала при расчете схемы выражение (1) дополнено нестационарным уравнением:

$$C_{th} \frac{dT}{d\tau} + \sigma_{th}(T - T_{amb}) = P, \quad (5)$$

где $P(\tau) = I_d(\tau) \cdot U_d(\tau)$ – выделяемая в канале мощность; τ – текущее время; C_{th} – теплоемкость; σ_{th} – теплопроводность; T_{amb} – температура основания транзистора.

Согласно известной электротепловой аналогии, этому уравнению может быть поставлена в соответствие эквивалентная тепловая подсистема, описывающая изменение температуры канала со временем. Используемая в работе тепловая подсистема содержит источник тока, величина которого равна выделяемой в канале мощности, а также сопротивление и емкость, эквивалентные тепловому сопротивлению и теплоемкости кристалла транзистора, соответственно. Для расчета ПТШ с учетом эффекта саморазогрева тепловая подсистема включается в эквивалентную схему транзистора. Напряжение на тепловой подсистеме, численно равное температуре канала транзистора, используется для определения значений, зависящих от температуры параметров модели. Таким образом, обеспечивается схемотехническая реализация

нестационарного уравнения для температуры и его совместное решение с уравнениями электрической схемы в автоматизированных системах проектирования [8].

Идентификация параметров модели начинается с определения теплового сопротивления транзистора, как ключевого параметра, определяющего температурный режим работы полупроводникового прибора. Данная процедура проводится на основании измерения ВАХ транзистора при двух значениях температуры его основания [9].

После нахождения теплового сопротивления проводится идентификация неизвестных коэффициентов модели нелинейного источника тока стока (I_{dss0} , U_{T0} , α , β_k , λ , γ , α_I) в порядке, приведенном на рис. 1, на основании измерений выходных ВАХ.

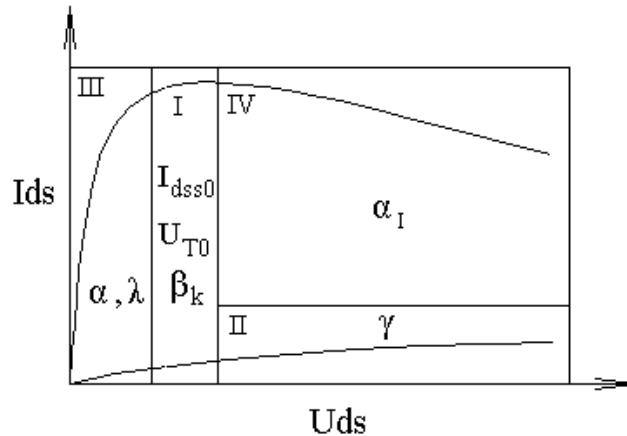


Рис. 1. Области определения коэффициентов модели

На первом этапе (область I на рис. 1), по передаточной характеристике, взятой при стоковом напряжении, соответствующем области перегиба выходных ВАХ, находятся коэффициенты аппроксимирующего полинома β_k , а также ток насыщения I_{dss0} и напряжение отсечки U_{T0} . Затем (область II) определяется наклон расчетных ВАХ в области низких значений тока стока путем подбора коэффициента γ . На третьем этапе (область III) добиваются наилучшего описания характеристик в линейной области выходных характеристик подбором параметров α и λ . На последнем этапе (область IV) определяется коэффициент α_I по наилучшему описанию наклона ВАХ, обусловленного эффектом саморазогрева. Для более точного моделирования выходных ВАХ после проведения этих процедур необходимо сделать уточнение параметров аппроксимации передаточной характеристики I_{dss0} , U_{T0} и β_k , на основании найденных значений остальных коэффициентов, и, если это будет необходимо, провести повторную идентификацию параметров.

Таким образом, задача идентификации параметров модели нелинейного источника тока стока ПТШ с учетом эффекта саморазогрева осложнена необходимостью учета изменения при нагреве температурно-зависимых параметров и в связи с этим носит итерационный характер.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных измерений и расчета семейства выходных ВАХ исследуемого ПТШ.

Моделирование электронных схем с использованием разработанной модели ПТШ проводилось в системе автоматизированного проектирования электронных устройств OrCAD 9.1. При этом эквивалентная схема ПТШ совместно с тепловой подсхемой составлялась в редакторе схем системы из стандартных компонентов: сопротивлений, емкостей, индуктивностей, а также нелинейных источников тока и напряжения, управляемых напряжением. Для моделирования токов и емкостей перехода применена встроенная модель полупроводникового диода. Функциональное описание модели ПТШ и значения ее параметров выносилось во внешний файл [9]. Полученная в результате схема использовалась при дальнейшем анализе и идентификации параметров исследуемого в работе серийного интегрального ПТШ с затвором $300 \times 0,7$ мкм.

Высокочастотные характеристики ПТШ рассчитывались на основании представления транзистора как четырехполюсника, описанного матрицей s -параметров. Значения пассивных элементов эквивалентной схемы найдены в ходе минимизации отклонения расчетных значений s -параметров от экспериментальных. Для этого применялась программа оптимизации, входящая в пакет OrCAD 9.1. На рис. 3 приведены результаты расчета s -параметров в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц.

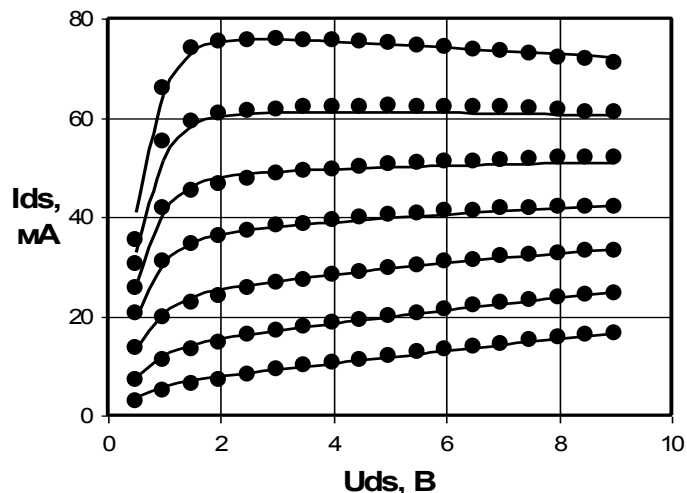
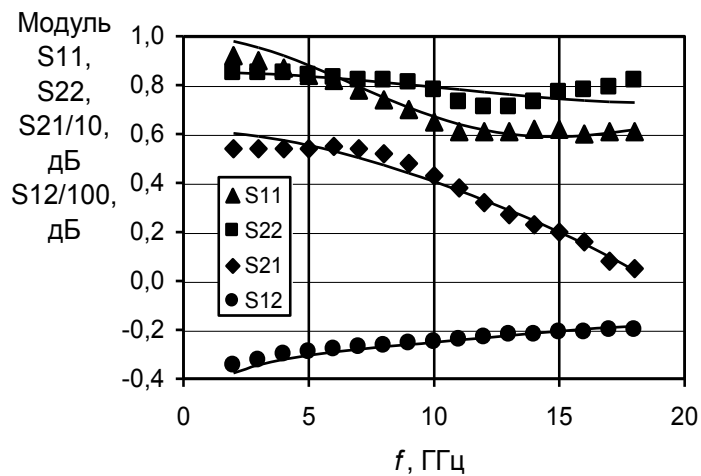
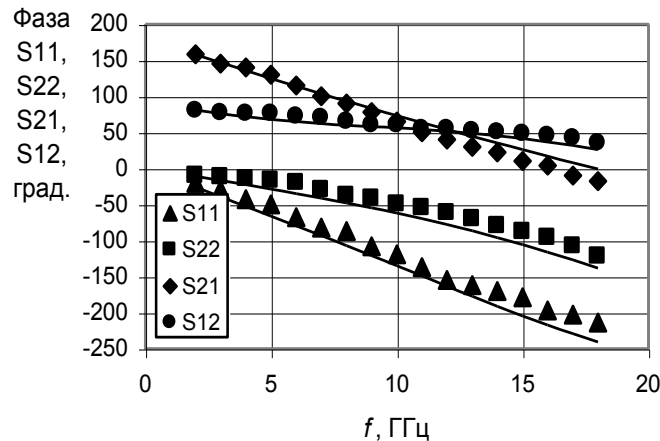


Рис. 2. Выходные ВАХ ПТШ (● – эксперимент; — – моделирование).
Напряжение на затворе изменяется от 0 В до -3 В с шагом 0,5 В



а



б

Рис. 3. Результаты эксперимента (символы) и моделирование (линии) абсолютных значений (а) и фаз (б) s -параметров интегрального ПТШ

После идентификации параметров проведен анализ влияния эффекта саморазогрева ПТШ на его статические и высокочастотные характеристики. Как и ожидалось, при расчете статических характеристик ПТШ с учетом и без учета эффекта саморазогрева наибольшее расхождение наблюдается при высоких значениях напряжения и тока стока. При аналогичном расчете s -параметров обнаружено, что под действием саморазогрева в основном происходит уменьшение коэффициента прямой передачи сигнала и увеличение коэффициента отражения от выхода, что свидетельствует о преобладающем влиянии на характеристики прибора изменения проводимости полупроводника.

Анализ воздействия одночастотного и двухчастотного сигналов на узкополосный усилитель с двухсторонним согласованием реактивными цепями проводился путем расчета переходного процесса с последующим спектральным анализом выходного сигнала методом быстрого преобразования Фурье также с использованием пакета программ OrCAD 9.1. На рис. 4 приведено сопоставление расчетных зависимостей амплитуд комбинационных составляющих 3-го и 5-го порядка от величины входной мощности P_{in} с экспериментальными данными [5], что подтверждает возможность адекватного моделирования нелинейных искажений сигналов до 5-го порядка включительно.

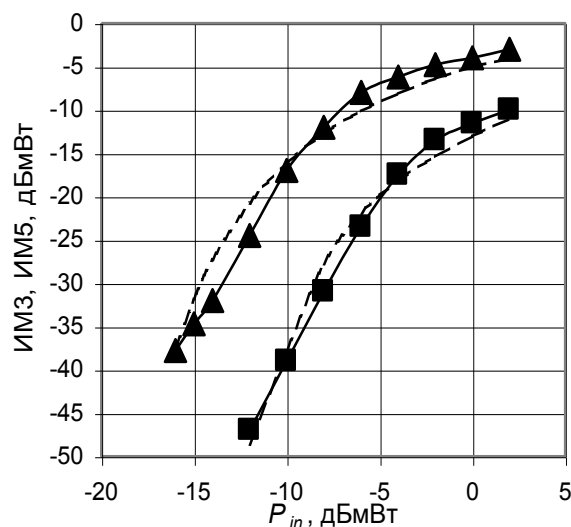


Рис. 4. Амплитуды основного сигнала и комбинационных составляющих 3-го (▲) и 5-го (■) порядка (--- – расчет, — — экспериментальные данные)

В результате расчета спектра сигнала на выходе усилителя с учетом и без учета эффекта саморазогрева было обнаружено снижение амплитуд гармоник основного сигнала в результате саморазогрева канала. Также наблюдались изменения в амплитудах высших гармоник и комбинационных составляющих спектра, причем влияние эффекта саморазогрева растет с увеличением порядка побочного колебания.

Также проведен расчет усилителя бегущей волны. Он анализировался в условиях, аналогичных усилителю с реактивными цепями согласования. Влияние эффекта саморазогрева при этом приводило к уменьшению коэффициента прямой передачи и верхней частоты полосы усиления. Анализ влияния эффекта саморазогрева на выходной спектр при воздействии одночастотного и двухчастотного сигналов на входе, как и в случае однокаскадного усилителя, показал, что наблюдается уменьшение амплитуд высших гармоник основного сигнала, а изменения в амплитудах гармоник и комбинационных составляющих спектра увеличиваются с ростом порядка побочного колебания [10].

Таким образом, разработана модель 7-го порядка ПТШ с учетом эффекта саморазогрева, позволяющая адекватно рассчитывать нелинейные искажения сигналов до 5-го порядка включительно. Предложена методика идентификации параметров этой модели ПТШ, основанная на измерениях при постоянном токе и в рабочем СВЧ диапазоне с использованием процедуры оптимизации параметров в пакете программ OrCAD 9.1 или аналогичных, которая обеспечивает их определение с точностью, достаточной для адекватного описания статических и высокочастотных характеристик транзистора. Выполнен расчет ИМИ 3-го и 5-го порядка в СВЧ усилителе, а также проведен анализ влияния эффекта саморазогрева на их величину в двух различных конструкциях усилителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Curtice W.R. GaAs MESFET modeling and nonlinear CAD // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1998. Vol.36, № 2. P.220-230.
2. Maas S.A., Neilson D. Modeling MESFET's for intermodulation analysis of mixers and amplifiers // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1990. Vol.38, № 12. P.1964-1971.
3. Балдин В.А., Лазунин Ю.А. Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с затвором Шотки // Радиотехника. 1990. № 8. С.23-25.
4. Сивяков Б.К., Сивяков Д.Б. Нелинейная модель ПТШ для анализа искажений сигналов // Известия вузов. Электроника. 1998. № 1. С.56-60.
5. Hirose M., Uchitomi N. A large-signal model of self-aligned gate GaAs FET's for high-efficiency power-amplifier design // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol.47, № 12. P. 2375-2381.
6. Гурьянов А.А., Сивяков Б.К. Модели арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шотки // Актуальные проблемы электронного приборостроения и машиностроения: Сб. науч. статей. Саратов: СГТУ, 2002. С.115-120.
7. Сивяков Б.К., Гурьянов А.А. Моделирование СВЧ схем с учетом эффекта саморазогрева полевых транзисторов с барьером Шотки // Перспективы развития электроники и вакуумной техники на период 2001-2006 гг.: Материалы науч.-техн. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. С.81-84.
8. Гурьянов А.А., Сивяков Б.К. Моделирование СВЧ схем с учетом эффекта саморазогрева ПТШ в системе OrCAD // Новые технологии на железнодорожном транспорте и в образовании: Сб. науч. статей. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. С.85-88.

9. Гурьянов А.А., Сивяков Б.К. Эквивалентная схема ПТШ для расчета нелинейных СВЧ устройств с учетом тепловых процессов // Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы науч.-техн. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. С.110-118.

10. Сивяков Б.К., Гурьянов А.А. Анализ нелинейных искажений одночастотных и двухчастотных сигналов в ПТШ // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2002. С.78-81.

Сивяков Борис Константинович –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического университета

Гурьянов Алексей Анатольевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического университета

Сивяков Дмитрий Борисович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства»
Саратовского государственного технического университета

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314

Ю.Б. Томашевский

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ГИБКОСТИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Представлена концепция гибкости в электротехнических комплексах, обеспечивающих электроснабжение потребителей с различными параметрами электроэнергии. Предложен подход к формированию количественных показателей гибкости. Разработаны методы выбора установленной мощности отдельных модулей.

Yu.B. Tomashevsky

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF FLEXIBILITY IN ELECTROTECHNICAL COMPLEXES

This article presents the concept of flexibility in electrotechnical complexes ensuring powersupply of the consumers with various parameters of the electric power. The approach to formation of quantitative parameters of flexibility is offered here. The methods of a choice of the established capacity of separate modules are developed in this work.

В современных условиях экономично только такое производство, которое может быстро реагировать на внешние условия, ориентируясь на технологические возможности своего оборудования. Для этого оно должно быть гибким, т.е. таким, чтобы за короткое время и при минимальных затратах, не прерывая производственного процесса и не останавливая надолго оборудования, могло перейти на новые режимы в пределах технических возможностей и технологического назначения оборудования.

Первые попытки построить концепцию гибкости реализованы в гибких производственных системах (ГПС) в машиностроении [1, 2]. По мере дальнейшего охвата гибкими системами новых областей (приборостроение, информатика, микроэлектроника и др.) формируется системное ядро концепции, быстро адаптирующееся к внедрению в новые области.

Рост уровня автоматизации систем электроснабжения, с одной стороны, и постоянное удорожание электрической энергии, приводящее к возрастанию ее составляющей в себестоимости продукции, с другой, определили распространение методов гибкой автоматизации в электротехнических системах. Здесь, в силу специфики объекта, гибкость рассматривается

не как новый производственный процесс, который дает, например, резкий толчок повышению производительности, а как концепция, которая коренным образом изменит методы организации современного электроснабжения – от транспортирования электроэнергии до распределения и преобразования ее для конечных потребителей. В табл. 1 приведено соответствие факторов, влияющих на эксплуатационную эффективность гибких систем в машиностроении (ГПС) и гибких электротехнических комплексов (ГЭК) в электроэнергетике.

Таблица 1

Соответствие факторов, определяющих эффективность ГПС и ГЭК

№	ГПС	ГЭК
1.	Номенклатура деталей	Номенклатура нагрузок (потребителей электроэнергии)
2.	Обязательное и исчерпывающее выполнение требований по точности взаимного расположения и качеству обрабатываемых поверхностей деталей	Соблюдение всех требований по качеству электроэнергии
3.	Единство технологических (конструктивных) баз	Использование полупроводниковых ключей и силовых модулей на их основе с универсальными элементами управления
4.	Непрерывность работы всей гибкой системы	

В зависимости от конкретно решаемых задач разработчики гибких автоматизированных производств (ГАП) на первый план выдвигают различные аспекты гибкости, например, такие как (в скобках даны определения, адаптированные для области электроэнергетики):

– машинная гибкость – простота перестройки оборудования ГАП для производства заданного множества деталей (простота перестройки электротехнического оборудования ГЭК для электроснабжения нагрузок различных типонаименований);

– технологическая гибкость – способность производить заданное множество типов деталей разными способами (способность осуществлять питание нагрузок различных типов разными способами);

– производственная гибкость – способность продолжать обработку заданного множества деталей при отказах отдельных технологических элементов ГАП (способность продолжать питание нагрузок при отказах отдельных электротехнических устройств, входящих в состав ГЭК);

– гибкость по продукту – способность быстрого переключения на выпуск новых деталей (способность быстрого переключения на питание потребителей с измененными параметрами электроэнергии);

– гибкость по объему – способность ГАП эффективно функционировать при различных объемах производства (способность ГЭК оптимально функционировать при различных изменениях графиков нагрузки).

По методу технической реализации гибкость может быть встроенной и потенциальной. Встроенная гибкость определяет способность системы адаптироваться к внутренним и внешним воздействиям без вмешательства оператора. Потенциальная гибкость определяет способность системы адаптироваться к будущим изменениям, при этом необходима команда извне системы, например, системы управления верхнего уровня или вмешательство человека для перенастройки системы.

В общем случае электрическая сеть производственного объекта (рис. 1) содержит две составляющие: энергетический и информационный потоки. Одним из основных требований,

предъявляемых к энергетической составляющей, является качество электроэнергии, которое во всех точках подключения нагрузок H_1, \dots, H_m и генераторов $\Gamma_1, \dots, \Gamma_k$ должно отвечать определенным нормам. На рис. 1 ПУ $_{\Gamma_1}, \dots, ПУ_{\Gamma_k}$ – преобразовательные устройства, осуществляющие «стыковку» сети и генераторов; ПУ $_{УК}$ – преобразовательное устройство, обеспечивающее требуемое качество электрической энергии, например, компенсатор реактивной мощности (КРМ); ПУ $_{АН}$ – преобразовательное устройство, связывающее внешнюю сеть и аккумуляторные накопители (АН); ПУ $_1, \dots, ПУ_n$ – преобразовательные устройства, обеспечивающие питание нагрузок H_1, \dots, H_m с заданными параметрами электроэнергии (напряжения U_H , частоты f_H , числа фаз m), в общем случае отличными от параметров входной сети.

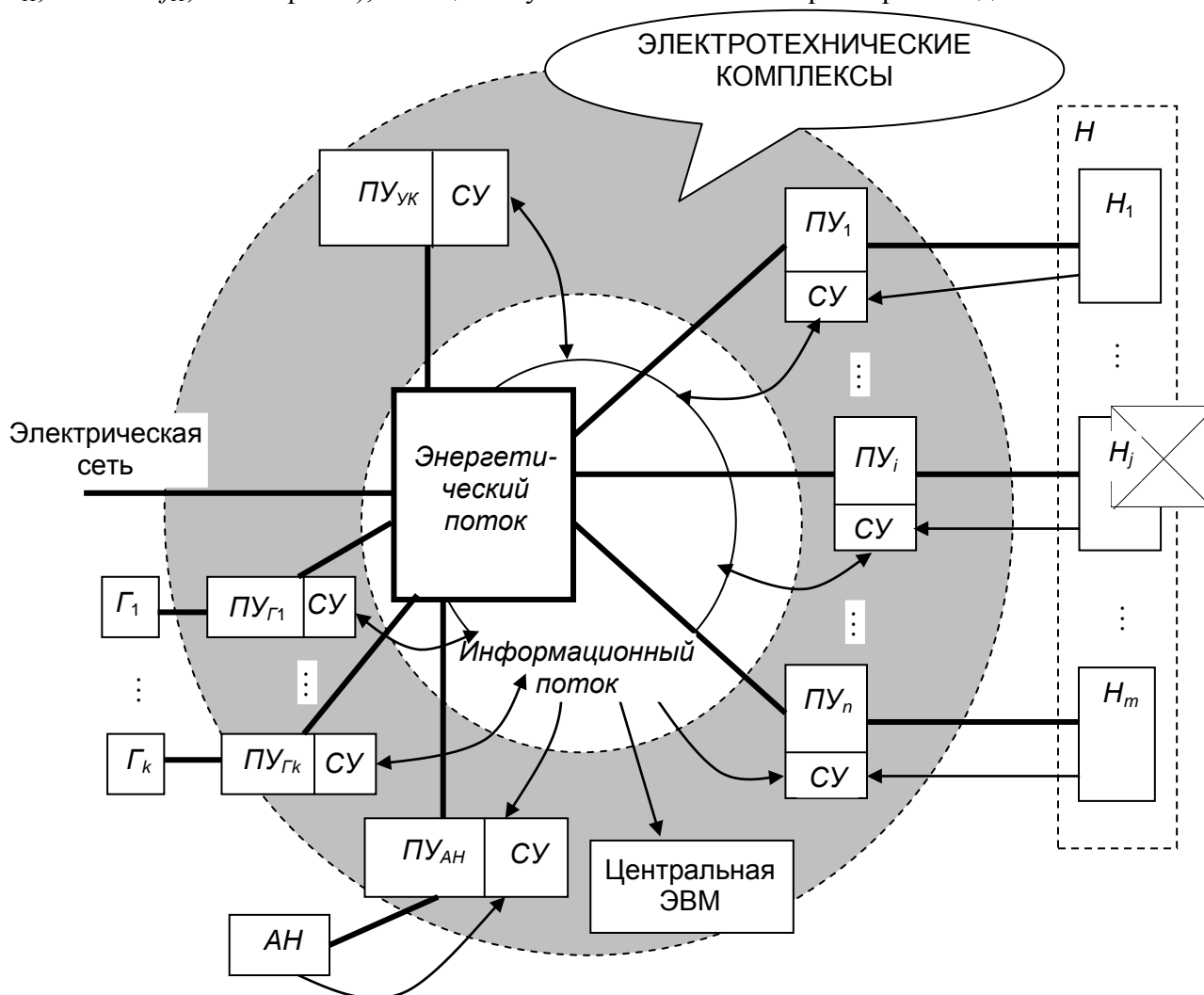


Рис. 1. Структура гибких электротехнических комплексов

Говоря об информационной составляющей, отметим, что с технической точки зрения необходимо, чтобы все устройства – генераторы, аккумуляторы, преобразователи, нагрузки могли обмениваться информацией. Только в этом случае возможно обеспечение общего эффекта оптимального потребления. На рис. 1 представлены элементы информационной среды: системы управления СУ, которые конструктивно располагаются в самых управляемых модулях электротехнической среды – преобразовательных устройствах, а также центральная ЭВМ. Последняя определяет стратегии управления всей системой, вырабатывая сигналы, задающие соответствующие режимы нагрузок, генераторов, аккумуляторов.

Выделенные преобразовательные устройства (ПУ) обладают управляемостью. В них принципиально заложена возможность изменения в широких пределах энергетических харак-

теристик U_H, f_H , мощности P_H , регулирование по требуемому технологическим процессом закону, рекуперация энергии. ПУ допускают автоматическое управление своими характеристиками. Таким образом, выделенный фрагмент рис. 1, включающий в себя электротехнические устройства и систему управления, является инструментальным средством, с помощью которого можно добиться оптимального энергопотребления. Определим выделенную подсистему как самостоятельный объект исследования, который позволяет построить принципиально новую систему электроснабжения, адаптивную к изменяющейся нагрузке. Структура такой системы оперативно перестраивается в зависимости от величины и характера нагрузки. Суть адаптации состоит в том, что в реальном масштабе времени поведение системы изменяется на основе измеренных текущих параметров в соответствии с тем или иным критерием (качества электроэнергии, надежности, минимума потерь и др.). Система управления определяет оптимальный состав преобразовательных устройств и реализует их перевод из одного режима в другой, включая резерв. Тем самым обеспечивается поддержание показателей функционирования электротехнического оборудования на максимально возможном уровне.

Гибкий электротехнический комплекс как объект проектирования и управления представляет собой систему нового класса, отличающуюся прежде всего сложностью, комплексностью и многофункциональностью компонентов. Одним из основных требований, обеспечивающих типизацию решений в области ГЭК, является принцип модульности, в соответствии с которым комплекс комплектуется из отдельных типовых модулей и систем [3], вот почему важным теоретическим фундаментом концепции гибкости является разработка теории модульных систем. Выделим две основные проблемы, требующие своего решения в первую очередь. Во-первых, отсутствует единый подход к формированию количественных показателей гибкости [4], а во-вторых, не разработаны методы выбора установленной мощности отдельных модулей.

Рассмотрим первую проблему. Понятие гибкости производственной системы является многокритериальным и неоднозначным. Многообразие технических, производственных и других задач, решаемых методами гибкой автоматизации, не дает возможности сформулировать единые методы комплексной численной оценки гибкости, позволяющие сравнивать различные системы. Используемый в ряде случаев метод оценки гибкости ГАП [1] по доле новых объектов производства заключается в том, что применительно к ГЭК в определении учитывается лишь номенклатура потребителей электроэнергии:

$$K_g = N \cdot K_{нов} / n \cdot 100, \quad (1)$$

где K_g – коэффициент уровня гибкости; N – номенклатура потребителей, обеспечиваемых электроэнергией с соответствующими параметрами за определенный период времени; $K_{нов}$ – коэффициент, учитывающий долю новых потребителей; n – количество потребителей.

Такая методика оценки гибкости приближительна и может применяться для функционирующих ГЭК при оценке мероприятий по организации электроснабжения новых потребителей.

Оценим гибкость электротехнических комплексов, питающих потребителей с различными параметрами электроэнергии.

Представим компоновки ГЭК совокупностью электротехнических параметров на входе и выходе, которую в дальнейшем будем называть интерфейсом. Для электротехнических систем одной из форм представления интерфейсов является следующая

$$I = (U, f, m, S), \quad (2)$$

где U – линейное напряжение, В; f – частота, Гц; m – фазность; S – установленная мощность, кВА.

Будем сравнивать множество реализаций ГЭК X_0 , предназначенных для достижения одного и того же набора режимов $\{a_i, i=1, n\}$. Далее, обозначим через x_{0i} вариант X_0 в режиме a_i . Воспользуемся известным способом сопоставления показателей вариантов гибкой систе-

мы с «идеальными». Последние выбираются на основе ГОСТов, опыта разработчика или достигнутых значений параметров лучших мировых образцов.

При формализации оценки гибкости ГЭК, питающих потребителей с различными параметрами электроэнергии, необходимо учитывать степень достижения требуемого качества функционирования системы электроснабжения в каждом из режимов работы на основе выбранных показателей.

Как показывает опыт оценки эффективности электротехнических систем, наиболее значимыми являются следующие группы показателей:

- качества генерируемой или потребляемой электроэнергии;
- потерь электроэнергии;
- установленной мощности.

Для формализации задачи введем множество показателей Π , содержащее три элемента, соответствующих каждой группе, и аддитивную меру g на этом множестве, для которой

$$\sum g_j = 1 . \quad (3)$$

Нормируя Π относительно «идеальных» значений показателей q_{udj} , перейдем к множеству Π^* , каждый элемент которого определится как [5]

$$q_j^* = \begin{cases} \frac{q_{udj}}{q_j} & \text{при } q_{udj} = \min \\ \frac{q_j}{q_{udj}} & \text{при } q_{udj} = \max . \end{cases} \quad (4)$$

На основании множества Π^* может быть получен обобщенный показатель Q_i , характеризующий степень достижения ГЭК требуемого качества электроснабжения в i -м режиме работы.

$$Q_i = \sum g_j q_j^* . \quad (5)$$

Из приведенных выражений следует $Q_i \leq 1$.

Случай $Q_i=1$ соответствует идеальному варианту.

Поскольку не все режимы имеют одинаковую важность, то, вводя аддитивную меру p на множестве режимов, отражающую их сравнительную важность, для которой

$$\sum p_i = 1 , \quad (6)$$

получим оценку гибкости электротехнических комплексов, питающих потребителей с различными параметрами электроэнергии

$$G_L = \sum p_i Q_i . \quad (7)$$

Рассмотрим пример оценки гибкости двух вариантов электротехнических комплексов, питающих два типа нагрузок, на основе следующих показателей:

- коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- мощности потерь P_R ;
- установленной мощности $S_{уст}$.

Пусть необходимо обеспечить электроснабжение двигательной нагрузки двух типов: сначала с параметрами $U=380$ В, $f=300$ Гц, $m=3$, $S_n=7,5$ кВА, а затем – с $U=380$ В, $f=400$ Гц, $m=3$, $S_n=5$ кВА. Здесь S_n – номинальная мощность нагрузки. Для реализации этой задачи сравним два варианта с явным звеном постоянного тока. Один – с инвертором тока (ИТ), другой с инвертором напряжения (ИН) в качестве выходного звена [6]. Результаты, на основе которых по предложенной методике оценивается гибкость, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка гибкости двух вариантов ГЭК

		$K_U, \%$	$P_R, \%$	$S_{уст}, \text{кВА}$	Аддитивная мера ρ
«Идеальный» режим 1		5	5	7,5	0,5
«Идеальный» режим 2		5	5	5	0,5
Аддитивная мера g		0,4	0,2	0,4	
Вариант ИТ	q_j (реж.1)	8,5	6	15	0,5
	q_j^* (реж.1)	0,588	0,833	0,5	0,5
	q_j (реж.2)	8	7	18	0,5
	q_j^* (реж.2)	0,625	0,714	0,278	0,5
Вариант ИН	q_j (реж.1)	20	7	8	0,5
	q_j^* (реж.1)	0,25	0,714	0,938	0,5
	q_j (реж.2)	18	8	8	0,5
	q_j^* (реж.2)	0,278	0,625	0,625	0,5

В итоге получаем для варианта ИТ

$$G_{L1} = 0,5(0,4 \times 0,588 + 0,2 \times 0,833 + 0,4 \times 0,5) + 0,5(0,4 \times 0,625 + 0,2 \times 0,714 + 0,4 \times 0,278) = 0,553,$$

а для варианта ИН

$$G_{L2} = 0,5(0,4 \times 0,25 + 0,2 \times 0,714 + 0,4 \times 0,938) + 0,5(0,4 \times 0,278 + 0,2 \times 0,625 + 0,4 \times 0,625) = 0,552.$$

Для представленных в таблице значений весов g_i , когда K_U и $S_{уст}$ «везят» одинаково, получен важный результат: гибкость анализируемых систем, питающих два типа нагрузок, одинакова. При возрастании веса показателя качества кривой выходного напряжения (0,6; 0,2; 0,2) получаем $G_{L1}=0,597$ и $G_{L2}=0,448$, что свидетельствует о большей гибкости схемы с ИТ. При увеличении веса показателя установленной мощности (0,2; 0,2; 0,6) имеем $G_{L1}=0,509$ и $G_{L2}=0,655$, что делает результат сравнения гибкости в пользу варианта с ИН.

Рассмотрим вторую проблему. В работах [7,8] указано, что для ряда критериев существует оптимальное значение единичной установленной мощности отдельных модулей, образующих ГЭК. Например, критерий, соответствующий минимизации избыточной установленной мощности электротехнического оборудования, имеет вид

$$\int_0^{T_u} (S_S(t) - S_H(t)) dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $S_S(t)$ – общая установленная мощность системы в момент времени t ; $S_H(t)$ – изменение нагрузки в момент времени t ; T_u – время производственного цикла.

Этот критерий позволяет эффективно использовать установленную мощность ГЭК. Выполнение (8) приводит к максимальной загрузке работающего электротехнического оборудования, отражая важное эксплуатационное требование – уменьшение вложений в незагруженную мощность. Неиспользованное оборудование в виде отключенных модулей, суммарная установленная мощность которых носит переменный характер и определяется величиной $(S_{\max} - S_S(t))$, может использоваться как резерв для повышения надежных характеристик, для улучшения энергетических показателей по входу и выходу путем функциональных перестроек модулей, для проведения профилактических и ремонтных работ и т.д.

В дискретной форме критерий (8) примет вид

$$\sum_{i=1}^{in} (S_i(t_i) - S_H(t_i)) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $S_i(t_i)$ – значение установленной мощности ГЭК, обеспечиваемое группой параллельно включаемых модулей $S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, \dots, S_{id}$, при этом $\forall t \in \Delta t = [t_i; t_{i+1}[$, $i = 1, ni-1$, должно выполняться условие

$$S_i(t_i) \geq S_H(t) . \quad (10)$$

Очевидно, что при $d \rightarrow \infty$ и $\Delta t \rightarrow 0$ критерий (9) будет минимален, что приводит к технически нереализуемому решению из-за роста числа переключений в системе $sw \rightarrow \infty$. Естественно, что состав критериев должен быть расширен рассмотрением таких функциональных характеристик как надежность, экономичность, технологичность и других, определяющих потребительское качество ГЭК. Например, при изменении нагрузки от S_{\max} до S_{\min} кратность резервирования, влияющая на надежность, многократно возрастает за счет структурной избыточности самого ГЭК. При оценке потерь из-за перерывов в электроснабжении, вспоминая экономичность, стараются уменьшить величину резерва, решая таким образом проблему уменьшения инвестиций в незагруженную мощность.

Осуществим выбор величины единичной мощности S_x при создании модульных ГЭК, обеспечивающей оптимальность критерия, связывающего надежность комплекса с резервированием по схеме (N+k) и затраты на его приобретение

$$C(S_x) \cdot S_x \cdot (N + k) \rightarrow \min . \quad (11)$$

Отметим, что с ростом установленной мощности оборудования в электротехнике удельная стоимость $C(S_x)$ падает. Оговоримся, что речь идет о модульной технике, комплектуемой из рядов элементов, изготавливаемых в рамках соответствующего единого технологического базиса.

Будем аппроксимировать изменение удельной стоимости линейной функцией

$$C = aS_x + b , \quad (12)$$

где a, b – коэффициенты, значения которых находятся из уравнений для соответствующих значений S_{\min} и S_{\max}

$$\begin{cases} C_1 = aS_{\min} + b \\ C_2 = aS_{\max} + b \end{cases} . \quad (13)$$

Решая систему уравнений (13), окончательно имеем

$$\begin{cases} a = \frac{C_1 - C_2}{S_{\min} - S_{\max}} \\ b = \frac{C_2 S_{\min} - C_1 S_{\max}}{S_{\min} - S_{\max}} \end{cases} . \quad (14)$$

Осуществив подстановку $N=S_{\max}/S_x$, (12) в (11) и приравнивая производную полученного выражения по S_x к нулю, находим значение, обеспечивающее выполнение критерия (11)

$$S_x = - \frac{aS_{\max} + b}{2a} . \quad (15)$$

После подстановки (14) в (15) имеем

$$S_x = \frac{C_2 (S_{\max} - kS_{\min}) + C_1 S_{\max} (k-1)}{2k(C_1 - C_2)} . \quad (16)$$

Полученный результат связан с линейной аппроксимацией удельной стоимости (12). Естественно, что на практике могут использоваться и другие модели. Окончательный выбор

зависит от многих факторов, включающих тип электротехнического оборудования, объем и достоверность данных и т.д. Например, при экспоненциальной аппроксимации, представляемой функцией

$$C = a e^{-bS_x}, \quad (17)$$

выражение для определения величины единичной мощности S_x при создании модульных ГЭК, обеспечивающей оптимальность критерия (11), будет иметь вид

$$S_x = \frac{k - bS_{\max}}{bk}. \quad (18)$$

Рассмотрим другой критерий, связывающий (8) и такой показатель, как потери электроэнергии. Относительные потери для отдельного модуля имеют вид

$$P_x^* = \frac{1 - \eta S_x}{S_x}, \quad (19)$$

где η – КПД модуля с номинальной мощностью S_x .

Из практики известно, что с уменьшением установленной мощности электротехнического агрегата его КПД падает, поэтому в общем случае имеет место зависимость $\eta(N)$. С учетом того, что ГЭК за счет отключения избыточных модулей поддерживает режим функционирующих, близкий к номинальному, то для относительных потерь при изменениях мощности нагрузки от 0 до S_{\max} можно записать

$$P_{\Sigma}^* = \frac{\sum_{n=1}^N (1 - \eta(N)) S_x n \Delta t}{S_{\max} t_1},$$

где n – текущее количество работающих модулей.

После преобразований имеем

$$P_{\Sigma}^* = \frac{(1 - \eta(N)) \sum_{n=1}^N n}{N^2}.$$

Окончательно получаем

$$P_{\Sigma}^* = \frac{(1 - \eta(N)) (2N + 1 + (-1)^N)}{4N}. \quad (20)$$

Анализируя выражения (8) и (20) при изменении N , получаем, что с ростом N избыток установленной мощности ГЭК уменьшается, а потери, наоборот, увеличиваются. Связывая оба выражения через удельную стоимость установленной мощности C_{ycm} и потерь C_n соответственно, получаем общий критерий в виде

$$C_n \frac{(1 - \eta(N)) (2N + 1 + (-1)^N)}{4N} + C_{ycm} \frac{1}{2N} \rightarrow \min. \quad (21)$$

Аппроксимируя уменьшение КПД линейной зависимостью $\eta = aN + b$, получаем значение N , обеспечивающее выполнение (21)

$$N = \sqrt{\frac{C_{ycm}}{C_n(-a)}}. \quad (22)$$

Таким образом, для линейно изменяющегося графика нагрузки имеет место оптимальное в смысле критерия (21) значение единичной мощности отдельных модулей ГЭК.

Покажем выбор оптимального значения S_x на примере. Пусть диапазон изменения мощности нагрузки лежит в пределах от 0 до 100 кВА. Нагрузка характеризуется значениями напряжения и частоты, отличными от общепромышленных, то есть необходимо использовать электротехнические агрегаты в виде преобразователей частоты. Ограничим нижнюю границу величины установленной мощности S_x отдельного преобразователя на уровне 10 кВА. Соответственно КПД будет меняться от 0,95 ($S_x=100$ кВА, $N=1$) до 0,88 ($S_x=10$ кВА, $N=10$). Для этого случая $a=-0,008$. Вводя значения удельных стоимостей установленной мощности $C_{уст}$ и потерь C_n , например $C_{уст}/C_n=1/4,5$, на основании (22) получим $N=5,27$. Округляя до ближайшего целого, имеем величину S_x , обеспечивающую минимум критерия (21), равную 20 кВА. Затраты, вычисляемые по формуле (21), в этом примере будут равны 28,45 у.е. (Здесь у.е. – условная единица). Для сравнения при $N=4$ и $N=6$ выражение (21) дает результаты 33,31 и 31,95 соответственно.

Рассмотрим критерий (9). На практике стремятся выбрать ряд модулей таким образом, чтобы выполнение условия (10) в точках t_i происходило за минимальное число шагов, то есть $sw \rightarrow \min$. С учетом этого целесообразно при формировании модульных структур ГЭК по критерию минимальной установленной мощности воспользоваться критерием

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^{in} (S_j(t_i) - S_H(t_i))}{S_j} sw \rightarrow \min. \quad (23)$$

В этом случае минимизация установленной мощности в ГЭК зависит от ряда модулей, который необходимо определить, шага дискретизации времени, который определяется характером изменения нагрузки и техническими средствами анализа функционирования ГЭК, а также от графиков изменения нагрузок.

На рис. 3 представлена зависимость $K_s(\Delta S^*)$, показывающая, как меняется критерий (23) при изменении единичной мощности равномерного ряда для графика нагрузки, отображенного на рис. 2. Здесь $\Delta S^* = S_{ном}/S_{max}$ – относительная величина номинальной мощности модуля; S_{max} – максимальная установленная мощность всей системы.

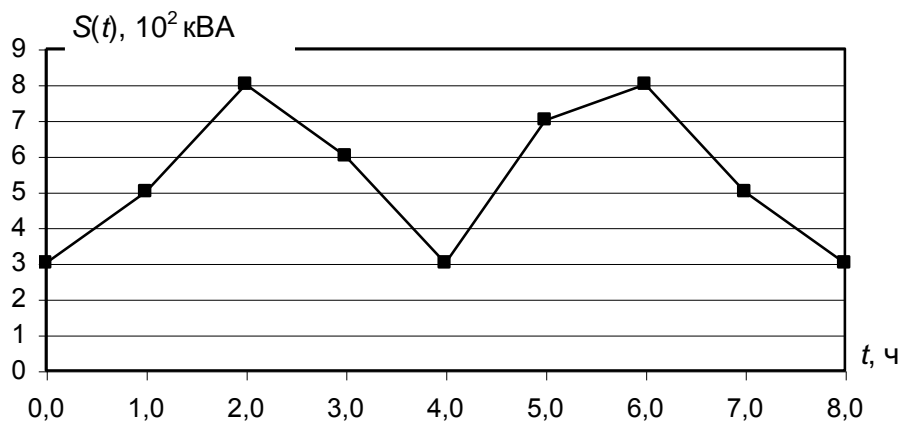


Рис. 2. График изменения нагрузки $S(t)$

Поиск оптимального значения ΔS^* осуществлялся в диапазоне $[0,05; 0,35]$ с шагом 0,01. Результаты показывают, что для графика нагрузки, представленного на рис. 3, оптимальное значение относительной мощности модуля равно 0,27.

Разработанные методики выбора величины единичной мощности S_x при создании модульных ГЭК, обеспечивающей оптимальность критериев (11), (21) и (23), позволяют повысить гибкость систем электроснабжения с учетом таких характеристик, как установленная мощность, надежность и потери электроэнергии.

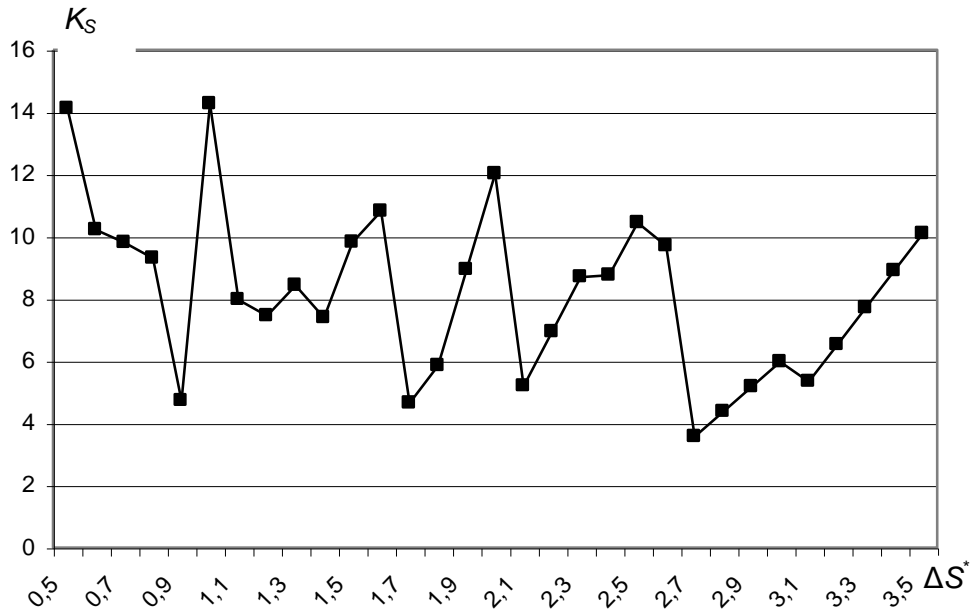


Рис. 3. Зависимость критерия $K_S(\Delta S^*)$ в диапазоне изменения единичной мощности $[0,05; 0,35]$ равномерного ряда с шагом 0,01 для графика $S(t)$, представленного на рис. 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: В 9 кн. Кн.7. Гибкие автоматизированные производства в отраслях промышленности: Учеб. пособие для вузов / И.М. Макаров, П.Н. Белянин, Л.В. Лобиков и др.; Под ред. И.М. Макарова. М.: Высшая школа, 1986. 176 с.
2. Гавриш А.П., Ямпольский Л.С. Гибкие робототехнические системы: Учебник. Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. 407 с.
3. Томашевский Ю.Б., Голембиовский Ю.М., Пятницын В.Н. Модульный принцип организации как основа гибких преобразовательных систем // Технічна електродинаміка: Тем. вып. Киев, 2000. Ч.1. С.35-38.
4. Митяшин Н.П., Голембиовский Ю.М., Томашевский Ю.Б. Оценка гибкости систем силовой электроники // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды V Междунар. конф. В 9 т. Новосибирск, 2000. Т.4. С.91-94.
5. Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б. Гибкие преобразовательные комплексы. Саратов: СГТУ, 2002. 128 с.
6. Энергетическая электроника: Справ. пособие / Пер. с нем.; Под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
7. Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Артюхов И.И. Адаптивные системы электропитания на базе агрегированных преобразователей частоты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2002. № 5-6. С.93-103.
8. Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Кузьмиченко Б.М. Системообразующие принципы построения электротехнических комплексов с изменяемой структурой // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 4. С.7-13.

Томашевский Юрий Болеславович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического университета

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 658.512

В.М. Таран, В.Н. Лясников, С.М. Лисовский, Н.А. Гусев

ГИБКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предложены методические основы гибкой (адаптивной) системы управления информационными структурами в виде проектных моделей знаний, направленные на повышение эффективности работы проектировщика технических объектов.

V.M. Taran, V.N. Lyasnikov, S.M. Lisovsky, N.A. Gusev

THE FLEXIBLE SYSTEM OF MANAGEMENT BY THE PROCESS OF DESIGNING OF TECHNICAL PROJECT

The article describes methodical bases of a flexible (adaptive) system of management by informative structures in the way of designed models of buildings focussed on improvement of technical projects designers qualifications.

Проектирование технических объектов представляет собой сложный технологический процесс, направленный на получение проектных решений в форме технической документации. Основной технологической операцией этого процесса является творческий труд проектировщика, т.е. его мыслительная деятельность. Традиционно творческий процесс считается прерогативой самого проектировщика, а качество этого труда оценивается его знаниями и способностями. Соответственно, качество проектных решений также неразрывно связано с качеством труда проектировщика, которое в свою очередь зависит от его опыта.

Существенное повышение производительности и улучшение качества труда проектировщика связано с включением в технологический процесс проектировщика ЭВМ. Традиционная технологическая схема «проектировщик – ЭВМ» (человеко-машинная система) состоит в том, что ЭВМ выполняет рутинную работу, а проектировщик – творческую. Очевидно, деление процесса проектирования на рутинный и творческий труд имеет временный и субъективный характер.

Будем придерживаться следующего подхода к определению этих видов работ. Любые проектные знания, направленные на получение проектных решений, которые проектировщик может формализовать и представить в программном виде для реализации на ЭВМ, будем от-

носить к рутинным. Те же знания, которые не удается формализовать – являются творческими для проектировщика.

При таком подходе появляется возможность решения ряда проблем, связанных с повышением эффективности процесса проектирования технических объектов и улучшением их качеств. Известно, что мыслительный процесс всегда системный и направлен на формирование в голове проектировщика знаний в форме моделей. Квалификация проектировщика проявляется, прежде всего, адекватностью формулируемых им моделей знаний получаемым на их основе решениям.

В тех случаях, когда подобные проектные задачи решаются несколькими проектировщиками, каждый из них должен в своей голове создавать свои модели решения, которые могут существенно отличаться по качеству и по времени их создания. Возможен и такой вариант, когда один и тот же проектировщик в разное время подобные задачи решает с различным качеством в связи с «забыванием» ранее удачно сформированной модели знаний.

Очевидно, что компьютеризация деятельности проектировщика открывает огромные возможности для повышения эффективности труда, поскольку компьютер «не забывает», и не подвержен психологическим воздействиям, которые неизбежно влияют на качество труда проектировщика.

Для компьютеризации рутинных знаний проектировщика эти знания необходимо извлечь из головы проектировщика и трансформировать их в активные информационные ресурсы компьютера. Препятствием для такой трансформации знаний является существенное различие в формах представления знаний для человека и для ЭВМ.

Человек представляет свои знания в разнообразных формах, удобных для него. Особенность этих знаний в том, что в них сложным образом объединены семантические, синтаксические и прагматические характеристики. Для ЭВМ знания необходимо формализовать на основе синтаксических характеристик. Очевидно, что семантические и прагматические характеристики всегда остаются прерогативой человека.

Для унификации представлений и совместного использования знаний в человеко-машинной системе знания необходимо формализовать.

Методической основой решения этой задачи является системный анализ, в качестве центральных вопросов в котором рассматриваются: моделирование, информатизация, управление (принятие решений).

В настоящей работе представлена методика формализации знаний проектировщика для совместного использования их в человеко-машинной системе.

На рис. 1 представлена структурная схема, на которой отражены составляющие творческого процесса проектирования и связи между ними.

Система проектирования всегда имеет цель, направленную на решение проектных задач и повышение эффективности самого процесса проектирования. В связи с этим она должна быть управляемой, т.е. иметь орган управления. Традиционным органом управления системы проектирования является административный орган, который решает организационно-плановые и ресурсные задачи проектирования.

В предлагаемой модели административный орган управления отнесен к внешней среде и не является объектом моделирования. При этом под управлением понимается процесс формирования и преобразования знаний, необходимых для решения конкретных задач проектирования объектов предметной среды. Очевидно, что речь идет о формировании управляющих решений проектировщика, направленных на повышение эффективности функционирования системы «проектировщик – ЭВМ». Поскольку творческий процесс всегда связан с обучением и гибким мышлением для адаптации знаний к конкретным условиям решаемой задачи, несомненно, система управления процессом проектирования также должна обладать этими функциями (рис. 2).

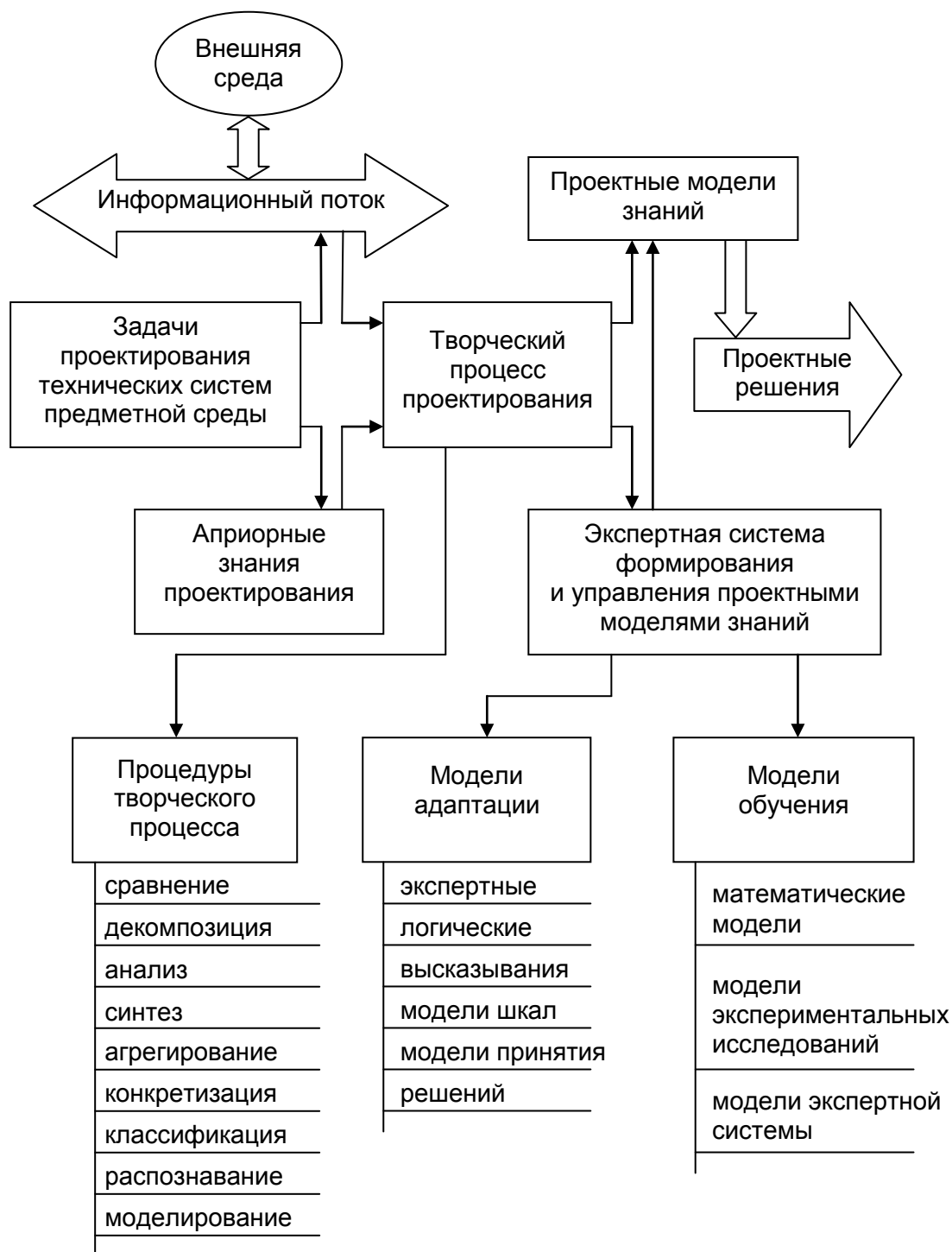


Рис. 1. Структурная схема творческого процесса проектирования технических систем

Среди разнообразных систем моделирования знаний человека в наибольшей мере требованиям адаптации и обучения отвечают модели экспертных систем. Эти модели, опираясь на методы анализа, синтеза и моделирования, развитые в системологии, а также на логические методы рассуждений человека, представленные в форме логического оператора ЕСЛИ-ТО, дают возможность сравнительно простыми средствами программировать сложные проектные знания на ЭВМ.

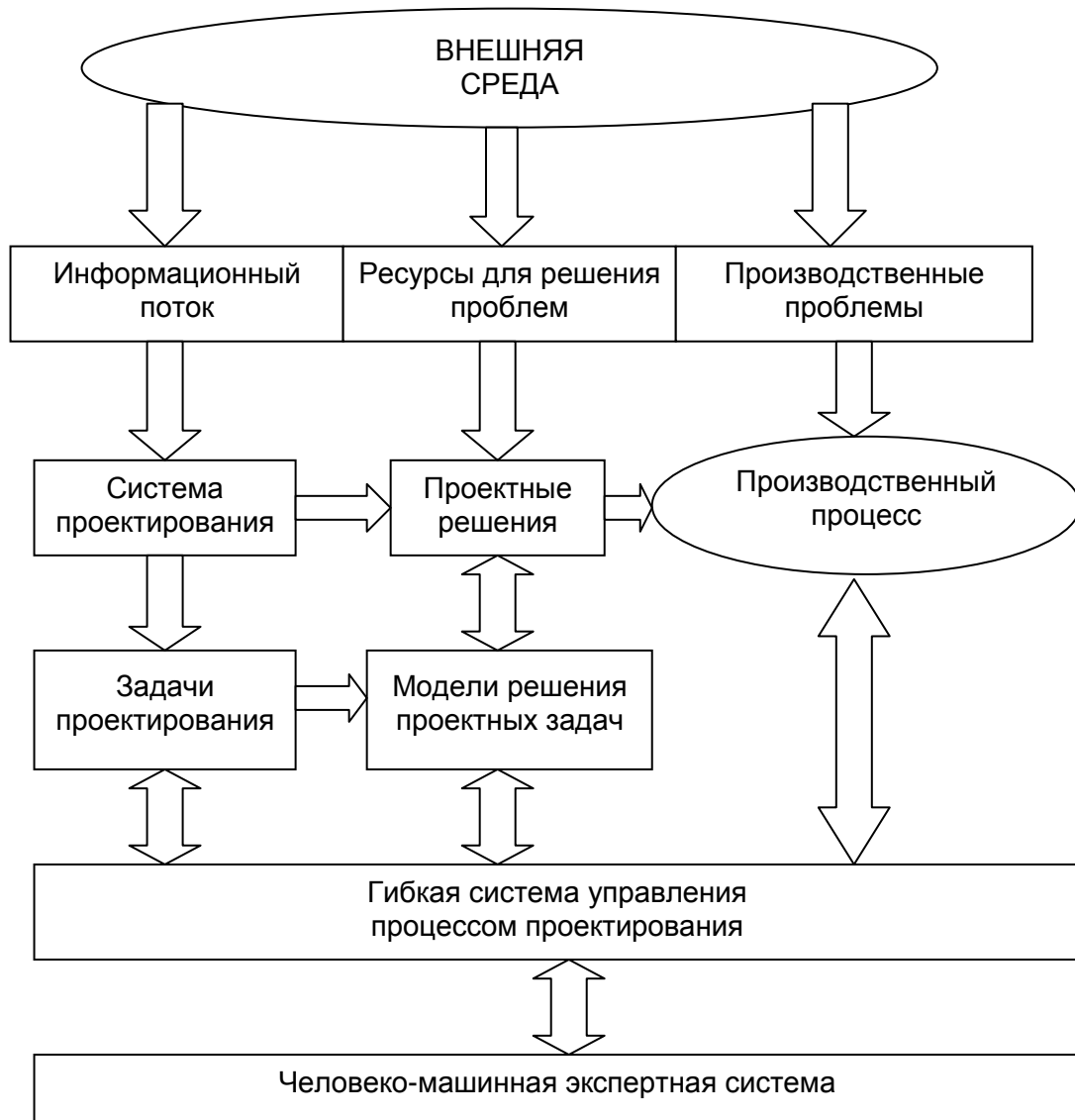


Рис. 2. Структурная схема гибкой системы управления процессом проектирования

Структурная схема человеко-машинной экспертной системы для управления модели знаниями проектировщика представлена на рис. 3.

Рассмотрим на содержательном уровне понятие «обучение», которое используется в адаптивных системах управления техническими объектами. В общем случае можно выделить два аспекта обучения: первый – для познавательных целей и второй – для принятия решений.

Первый аспект понятия обучения относится к педагогической дисциплине и не является предметом рассмотрения в данной работе.

Второй аспект, который находит все более широкое применение в технических дисциплинах, состоит в том, что некоторый «учитель» предоставляет «обучающему» тем или иным образом структурированные информационные модели, которые должны помочь «обучающему вспомнить или догадаться», как наилучшим образом решить техническую задачу, связанную с выбором одного из многих решений. В качестве «учителя» и «обучающего» в такой системе управления выступают как проектировщик, так и ЭВМ. При этом не исключаются методы компьютерного «самообучения», если для этих целей имеется подходящее программное обеспечение.

ние. Подчеркнем еще раз, что применительно к ЭВМ под терминами «учитель», «обучение», «самообучение» и т.д. необходимо понимать программное обеспечение, которому присвоено такое наименование в связи с его назначением по отношению к проектировщику.



Рис. 3. Структурная схема человеко-машинной экспертной системы

Согласно излагаемому подходу формализация процесса проектирования осуществляется на основе моделей знаний четырех видов. Первый вид представлен в форме информационно-справочных моделей (рис. 4), в которых обобщаются опыт и знания проектировщика по разнообразным техническим дисциплинам, относящихся к предметной среде. Эти модели являются обучающими для проектировщика.

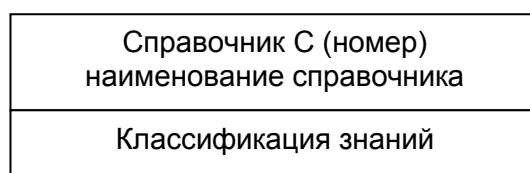


Рис. 4. Структурная схема информационно-справочной модели

Технологический аспект проектирования реализуется в алгоритмизированных моделях последовательности решения проектных задач.

При этом алгоритм проектирования выступает как процедурная модель, в состав которой входят модели двух видов: объектно-ориентированные проектные модели знаний и модели принятия решений (рис. 5).

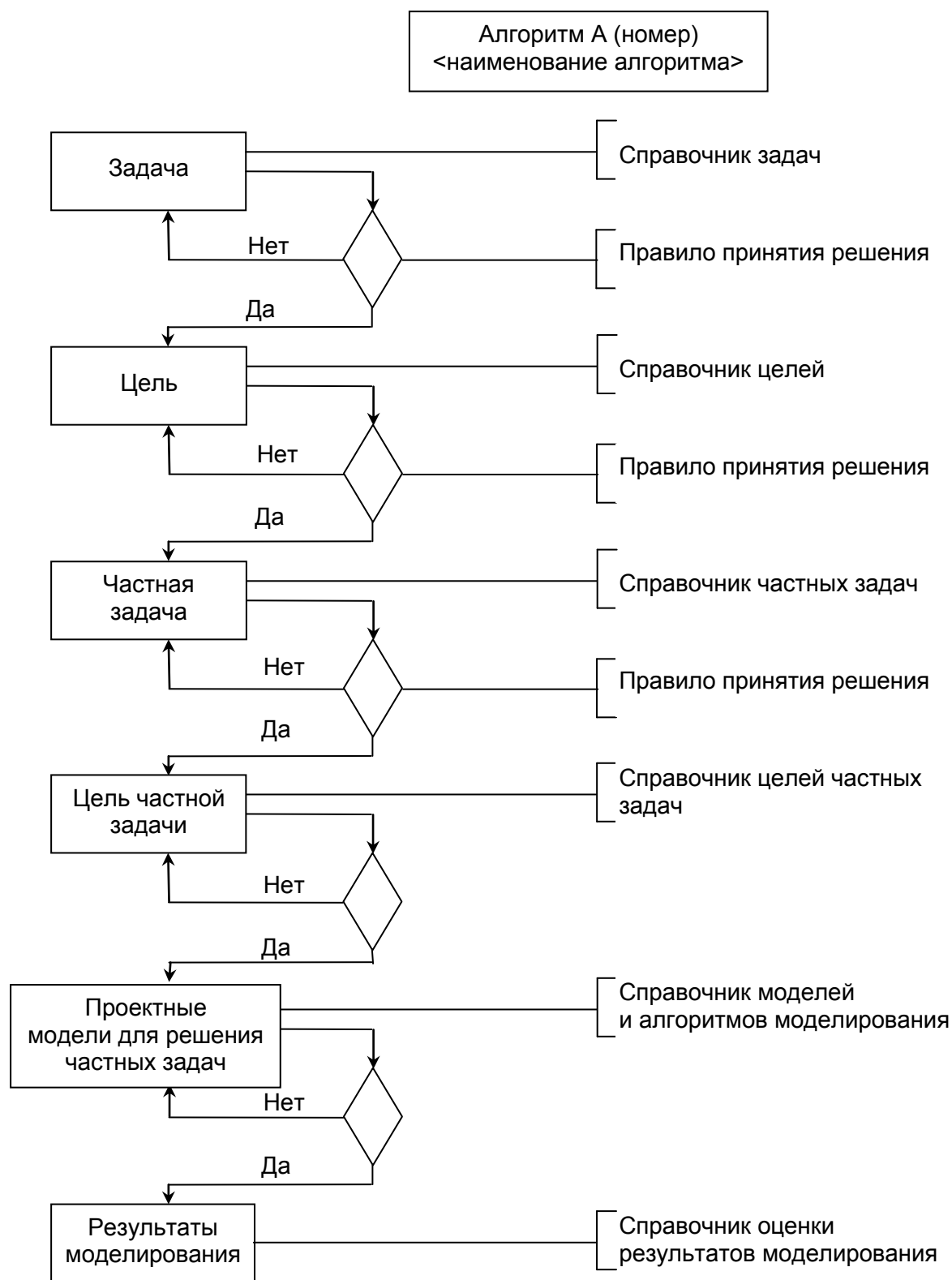


Рис. 5. Структурная схема алгоритма решения проектной задачи

Объектно-ориентированные проектные модели знаний формируются на основе информационно-справочных моделей в виде специально выделенных информационных единиц для решения отдельных этапов проектной задачи в последовательности, предписываемой алгоритмом.

Модели принятия решений предназначены для моделирования рассуждений проектировщика о целях, критериях, методах, возможностях, достоверности, других факторах, связанных с решением задачи.

Модели принятия решений обеспечивают адаптивный характер управления процессом проектирования. Авторами термин «адаптивное управление» трактуется как способность человеко-машинной системы достигать требуемой цели в условиях неопределенности на основе использования знаний проектировщика и информационного ресурса ЭВМ.

Принцип функционирования систем моделей знаний состоит в решении проектных задач на основе методов математического моделирования, экспериментальных исследований и экспертных оценок.

Ниже излагается математическая постановка задачи гибкого управления процессом проектирования технических объектов.

Формальную модель проектирования предметной среды запишем как объединение моделей знаний, необходимых для получения проектных решений.

$$\left[\begin{array}{l} PR = PZ \cup APMZ \cup PMZ \cup MPP \cup MA \cup MO; \\ PR = \{PR_i\}, i = \overline{1, n}; \\ PZ = \{PZ_j\}, j = \overline{1, m} \in C; \\ PZ = \{ЧПЗ_{jk}\}, j = \overline{1, m}; k = \overline{1, l} \in C; \\ APPZ = \{A_g\}, g = \overline{1, p} \in C; \\ MPP = \{P_p\}, p = \overline{1, q} \in C; \\ MPZ = \{P_m\}, m = \overline{1, l} \in \{C_k\}, k = \overline{1, n}; \\ MO = \{P_u\}, u = \overline{1, w} \in \{C_l\}, l = \overline{1, p}; \\ MA = \{P_h\}, h = \overline{1, q} \in C, \end{array} \right. \quad (1)$$

где PR – проектные решения; PR_i – множество проектных решений; PZ – проектные задачи; PZ_j – множество проектных задач; $ЧПЗ_{jk}$ – множество частных проектных задач; $APPZ$ – алгоритмы решения проектных задач; A_g – множество алгоритмов; MPP – множество правил принятия решений; MPZ – множество моделей проектных знаний; MO – множество моделей обучения; MA – множество моделей адаптации; P_p, P_m, P_u, P_h – множество позиций информационно-справочных моделей; C, C_k, C_l – множество информационно-справочных моделей.

С учетом изложенного подхода и особенностей предметной среды проектирования сформированы информационно-справочные модели (рис. 6).

Цель гибкой системы управления проектными моделями знаний (ГСУ ПМЗ) состоит в принятии решений, направленных на формирование проектных моделей знаний на основе информационного потока, сосредоточенного в информационно-справочных моделях, и оценки результатов моделирования.

Сложность управления указанными моделями обусловлена необходимостью представлять в формализованном виде рассуждения проектировщика по рассматриваемому вопросу проектной задачи, т.е. необходимостью формализации творческого процесса проектировщика. В работе для моделирования рассуждений проектировщика используется математический аппарат нечетких моделей и методы экспертных систем [3].

Позиции	Справочник С1 Цели решения проектных задач
П1	Изучение физико-химических явлений
П2	Определение существенных факторов явлений
П3	Проверка соответствия между факторами
П4	Изучение вероятностных распределений между факторами
П5	Получение функциональных зависимостей
П6	Изучение (анализ) поведения функциональных зависимостей
П7	Получение числовых значений факторов
П8	Разработка технологических процессов
П9	Оптимизация технологических процессов
П10	Совершенствование технологического оборудования и его систем
П11	Автоматизация технологий и оборудования
П12	Совершенствование методов проектирования
	Справочник С2 Методы решения проектных задач
П1	Математическое моделирование
П2	Экспериментальные исследования
П3	Экспертные методы
П4	Комбинирование
	Справочник С3 Признаки задач относительно ресурсных затрат по ее решению
П1	Сложность
П2	Трудоемкость
П3	Срочность
П4	Важность
	Справочник С4 Признаки задачи относительно оценки результатов решения
П1	Решение соответствует цели
П2	Решение задачи закончено
П3	Решение задачи необходимо продолжить
П4	Изменить условия решения задачи
П5	Перейти к решению следующей задачи
	Справочник С5 Признаки решения задачи
П1	Достоверность результата
П2	Существенность, значимость
П3	Адекватность
П4	Наличие корреляционной связи
П5	Наличие функциональной связи
П6	Наличие отношений между факторами
П7	Тип функциональной связи
П8	Характер функциональной связи

Рис. 6. Информационно-справочные модели

Моделирование знаний нечеткими логическими высказываниями существенно упрощает решаемую задачу за счет оцифровки качественных компонентов и использования разнообразных вероятностных и теоретико-множественных операторов для принятия решений.

Будем рассматривать задачу принятия решений, как процедуру преобразования входной информации, в качестве которой рассматриваются компоненты моделей знаний, их признаки, показатели и критерии, в выходную информацию, представляющую собой решения проектировщика по результатам моделирования. Очевидно, что при такой постановке решается многокритериальная (векторная) задача оптимизации в условиях неопределенности. При этом под оптимальным понимается принятие проектного решения, которое по определенным соображениям проектировщика предпочтительнее других. Поскольку в процедуре принятия решений важную роль играет субъективное мнение проектировщика, для моделирования этих процедур используются вероятностные и нечеткие логические операторы.

Формальную модель гибкой системы управления проектными моделями знаний запишем в следующем виде:

$$\left[\begin{array}{l} ГСУПМЗ = A \cup \tilde{L} \cup O; \\ A = (\tilde{A}_1 \rightarrow \tilde{A}_2); \\ \tilde{A}_1 = (X_1, \tilde{F}_1); \\ \tilde{A}_2 = (X_2, \tilde{F}_2); \\ X_1 = \{P_i\}, i = \overline{1, n} \in C_1, C_2, C_3; \\ X_2 = \{P_j\}, j = \overline{1, m} \in C_4, C_5; \\ O = \{P_k\}, k = \overline{1, l} \in C_6, \end{array} \right. \quad (2)$$

где A – информация, необходимая для решения проектной задачи; \tilde{A}_1 – входная информация нечеткой модели; \tilde{A}_2 – выходная информация нечеткой модели; X_1, X_2 – шкалы наименований информационных компонентов; P_i, P_j – множество позиций информационных шкал; C_1-C_5 – информационно-справочные модели; \tilde{F}_1, \tilde{F}_2 – нечеткие инциденты; \tilde{L} – нечеткие высказывания; O – правила принятия решений.

Процессы принятия решений связаны с процедурами сравнения компонентов информационного потока по определенным признакам, показателям, критериям. Эти процедуры должны обеспечивать установление определенных количественных отношений между рассматриваемыми компонентами моделей знаний. Математической основой процесса сравнения являются теории отношений и измерений. Таким образом, в процессе принятия решений необходимо осуществлять измерения информационных компонентов, находящихся в отношениях, предписываемых выражением (2).

В общем случае измерения могут быть объективными и субъективными, т.е. в качестве измерительной системы может выступать как технический прибор, так и сам проектировщик. Измеряемые компоненты могут иметь качественные или количественные значения, выраженные в различных физических единицах. Очевидно, что для процедуры сравнения столь разнообразных информационных компонентов необходимо использовать некоторые универсальные измерительные системы, например, в виде шкал.

В работе в качестве универсальных измерительных шкал предлагается использовать функцию принадлежности, степень соответствия, вероятностную шкалу $[0 \div 1]$ и процентную шкалу $[0-100]$.

В качестве нечетких моделей знаний могут использоваться нечеткие высказывания, нечеткие гиперграфы, нечеткие соответствия и др.

Выражение для нечетких высказываний проектировщика запишем следующим образом

$$\left[\begin{array}{l} \tilde{L} = \{\tilde{L}_p\}, p = \overline{1, q}; \\ \tilde{L}_p : \text{Если } A_1 \text{ ТО } A_2; \\ \tilde{F}_1 = \{\mu(X_1), \delta(X_1), r(X_1), p(X_1)\}; \\ \tilde{F}_2 = \{\mu(X_2), \delta(X_2), r(X_2), p(X_2)\}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где \tilde{L}_p – множество нечетких высказываний; $\mu(X_1), \mu(X_2)$ – функция принадлежности для информационных компонентов соответственно X_1, X_2 ; $r(X_1)=[0-100], r(X_2)=[0-100]$ – процентные шкалы для компонентов X_1, X_2 ; $p(X_1)=[0-1], p(X_2)=[0-1]$ – процентные шкалы для компонентов X_1, X_2 ;

$$\delta(X_1), \delta(X_2) = \left[\begin{array}{ll} \delta_1 = 1 & \text{(полностью соответствует)} \\ \delta_2 = 0,8 & \text{(соответствует)} \\ \delta_3 = 0,7 & \text{(близко соответствует)} \\ \delta_4 = 0,5 & \text{(более-менее соответствует)} \\ \delta_5 = 0,3 & \text{(плохо соответствует)} \\ \delta_6 = 0,1 & \text{(не соответствует).} \end{array} \right.$$

Предложенные методические основы гибкой (адаптивной) системы управления информационными структурами в виде проектных моделей знаний направлены на повышение эффективности проектных работ за счет компьютеризации сложных знаний проектировщика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таран В.М., Лисовский С.М. Система адаптивного проектирования вакуумно-плазменных технологий и автоматизированного оборудования // Управление и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С.96-99.
2. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989. 367 с.
3. Малышев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 280 с.

Таран Владимир Маркович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»
Саратовского государственного технического университета

Лисовский Сергей Михайлович –

кандидат технических наук, заместитель председателя правительства Саратовской области

Лясников Владимир Николаевич –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»
Саратовского государственного технического университета

Гусев Николай Александрович –

аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»
Саратовского государственного технического университета

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

УДК 656.073

В.Н.Клочков, С.А.Гусев, Н.К. Логинов

УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Рассматривается организация эффективных систем товародвижения, интеграция и системность логистики. Обсуждаются вопросы логистического управления, взаимосвязи и взаимозависимости показателей функционирования, издержек распределения и уровня предоставляемых услуг транспортно-логистических систем.

V.N.Klochkov, S.A.Gusev, N.K.Loginov

TRANSPORT-LOGISTIC SYSTEMS MANAGEMENT

This article describes ways to organize effective systems of goods-transportations; integrations and systems of the logistics. Problems of logistic control, interrelations of the indexes of functions, expenses of distribution and levels of services of transport-logistic systems are considered here.

Термин «логистика» имеет много определений. Поэтому в зависимости от обстоятельств его можно, в общем, понимать как «услуги по распределению», «физическое распределение», «управление запасами», «покупка и транспортировка», хотя между «логистикой» и этими терминами, а также между самими терминами существуют определенные различия.

Некоторые исследователи считают, что понятие «распределение» шире, чем «логистика», а «физическое распределение», относящееся к доставке продукции от продавца к потребителю, является лишь частью системы логистики.

По одному из воззрений, это мышление, направленное на организационно-структурное и организационно-аналитическое совершенствование (доводку, оптимизацию) потоковых процессов человеческой деятельности любого содержания [5].

Логистика (распределение или товарораспределение) объективно всегда была одним из главных и существенных элементов экономической деятельности, находясь на стыке производства, торговли, транспорта, маркетинга. Однако ранее функции, которые входят в зада-

чу логистики, признавались лишь в отдельности, а в качестве интегрированной экономической деятельности она получила развитие в последнее время. На логистику в развитых странах приходится в среднем около 12% от уровня валового внутреннего продукта.

Внимание деловых и научных кругов к логистике объясняется, в частности, тем, что ее значение как реального и мощного средства сохранения и повышения прибыльности компании, успешного ведения конкурентной борьбы значительно усилилось.

Большой импульс этому росту дало, прежде всего, увеличение издержек, связанных с перевозками и содержанием запасов. Из сказанного не следует, что деятельность в области логистики является лишь источником расходов и, значит, единственным действием служит ее ограничение. Наоборот, логистика вносит позитивный вклад в национальное богатство, организацию и регулирование процессов товаропродвижения в сфере приращения продукции и услуг, облегчая экономический процесс и во многих отношениях являясь его двигателем. Еще в 1915 г. А. Шо из Гарвардской школы бизнеса высказал мнение о роли логистики в качестве моста между созданием спроса и физическим снабжением. Однако, несмотря на серьезность данной идеи, на нее обратили мало внимания. Спустя полвека положение изменилось. В 1962 г. крупный специалист в области управления П. Дракер подчеркнул, что физическое распределение является границей в бизнесе, причем в этой сфере могут быть получены весьма ощутимые результаты в управленческой деятельности.

По мнению специалистов (экспертная оценка), применение логистики позволяет:

- снизить уровень запасов на 30-50%;
- сократить время движения продукции на 25-45%;
- сократить повторные складские перевозки в 1,5-2 раза;
- сократить расходы на автоперевозки на 7-20%, на железнодорожные – на 5-12% [3].

Наиболее характерной чертой логистики, которая до сих пор, как это ни парадоксально, мешает ее широкому распространению, является общесистемный подход к деятельности по перемещению материалов и готовых изделий от источника до потребления. Синонимом слова иностранного происхождения «системность» может быть русское – «целостность», что означает внутреннее единство, воспринимающееся как единое целое. Отсюда принципиальная недопустимость рассмотрения объекта, проблем или явления без учета всей сложности их внутреннего строения (структуры), взаимодействия (обмена) между составляющими систему элементами и подсистемами: веществом, энергией и информацией; отрывом от внешней среды (системного окружения), постоянного обмена между внутренней сущностью системы и средой; целенаправленности для достижения заданных конкретных результатов [1].

Такой подход вынуждает лиц, принимающих решения, признавать взаимосвязь и взаимозависимость между составными элементами системы перемещения товарно-материальных ценностей и множественностью функций, вызванных этим перемещением, стимулирует системное мышление, а не функциональный подход, при котором ответственность за запасы и транспорт является соответственно функцией производства и распределения, и решения по этим вопросам часто не согласуются.

Рассмотрение логистической структуры, т.е. функциональных зон, показывает, что в нее входит управление запасами (решения по планированию и обслуживанию потребности в материалах); хранение и обработка (размещение складов, упаковка и укрупнение товаров); транспорт, включая смешанные перевозки (выбор видов транспорта и их комбинаций).

Логистическое управление подразумевает интеграцию и координацию вышеупомянутой деятельности таким образом, чтобы конечные рынки обслуживались наиболее эффективным и экономичным образом. Главная цель логистики состоит именно в обеспечении «наличия» чего-то необходимого (материалов, услуг, транспортных средств).

Дальнейшей разработкой понятия «наличие» в западной литературе является определение цели логистики как «услуги клиенту». Данная идея охватывает все контакты между поставщиком и клиентом с точки зрения физического выполнения заказов. Важная черта этих усилий – взаимозависимость: если один вид деятельности оказался неудачным, де-стабилизировал рабочие нагрузки в смежных сферах и дал низкие результаты, то не имеет успеха система в целом.

Проявление логистики на уровне владельцев компаний приводит к тому, что каждый из них не желает отдавать прибыль: например, складу невыгодно сокращать объемы хранения грузов, а транспортникам предпочтительно увеличение числа ездов (применение принципа «точно в срок»), поэтому, когда владелец имеет и транспорт, и складские мощности – логистика более эффективна. Яркий тому пример – стремление Японии в принятии конвенции о международной дорожной перевозке грузов. Направленные усилия должны обеспечить перевозки производимых товаров одной компанией, даже в условиях островного государства, передавая грузы с одного вида транспорта на другой, при этом строго контролируя перемещение на всем протяжении маршрута и используя только свой подвижной состав.

Логистическое управление определяет необходимость наличия прогнозных оценок объема сбыта предлагаемых услуг, так как их отсутствие может повлиять на планирование потребности в материалах (транспортных средствах), что приведет к недостаточному запасу готовой продукции, а это, в свою очередь, может вызвать падение сбыта либо рост числа невыполненных заказов и увеличение продолжительности цикла их осуществления, а, следовательно, привести к необходимости ускорять отгрузку товаров. В результате повысится стоимость услуги.

Предоставление услуг более совершенного качества влечет за собой дополнительные издержки компании. По зарубежным данным, при повышении уровня услуг более чем на 70-80% (уровень услуг определяется как доля заказов для конкретного предприятия, которые можно выполнить со склада в течение определенного периода, в общем объеме заказов) связанные с этим издержки растут непропорционально. Заслуживают внимания компании, не имеющие представления об уровне услуг, при котором они действуют, либо устанавливают его произвольно. Однако предложение, например, 97%-го уровня услуг вместо 95%-го может лишь незначительно повлиять на спрос клиента, но существенно – на издержки товарораспределения, поскольку приведет к росту запаса на 14% [2].

В отношении издержек товарораспределения следует отметить, что в прошлом у компаний была тенденция учитывать в качестве таковых лишь свои издержки перевозки. Однако значительное число компаний приняло концепцию «общие издержки товарораспределения». Решения об уровне услуг, как отмечалось, влияют на размер товарных запасов, которые нужно поддерживать в системе, т.е. издержки хранения этих запасов также должны учитываться как издержки товарораспределения.

Издержки товарораспределения в промышленности составляют в среднем около 15% объема продаж типичной компании. Конечно, средние значения иногда не отражают действительного положения: в зависимости от характера бизнеса реальные цифры будут выше или ниже. Одно из преимуществ выявления конкретных источников издержек товарораспределения заключается в том, что оно облегчает определение взаимовлияния факторов, а значит, и выбор между ними. Это нужно в условиях, когда рост одних издержек компенсируется сокращением других.

В целом результаты действия факторов оцениваются двояко: во-первых, с точки зрения воздействия на общесистемные расходы и, во-вторых, на доход от сбыта. Существует возможность планирования издержек таким образом, чтобы общие расходы возросли, но благодаря лучшему обслуживанию выросли и доходы от сбыта. Если разница

между доходами и издержками увеличивается, это свидетельствует о повышении экономической эффективности.

В дополнение к возможности комбинировать издержки между различными элементами системы товарораспределения, то есть между издержками хранения и стоимостью запасов, можно выявить взаимовлияние факторов в рамках отдельного элемента. Например, уровень запасов готовых изделий в логистической системе может быть уменьшен за счет уровня предлагаемых услуг, а снижение дохода от сбыта компенсируется снижением издержек хранения.

Между функциями компаний, то есть подсистемами, могут происходить конфликты, когда цели определяются функциями без учета их действия на всю систему. Эту общую черту корпоративных структур называют «субоптимизацией» (имеется в виду, что без тщательного управления целое может иногда оказаться меньше, чем сумма его частей [2]).

Конечный результат использования логистической концепции – это снижение вероятности возникновения конфликтов в рамках компании путем большей интеграции и координации смежных видов деятельности. Однако недостаток деятельности многих компаний заключается в том, что перемещение материалов и соответствующая информация (заказы, прогнозы, данные о запасах) не рассматриваются ими в качестве интегрированной системы. Как правило, ответственность за различные функции, связанные с этими потоками, раздроблена. В лучшем случае предпринимается попытка частичной интеграции путем развития функции управления распределением, нацеленной на поставку готовых изделий.

Необходимо подчеркнуть, что реальное и полное использование логистического управления возможно при условиях наличия рынка, свободы выбора транспортных и других услуг и ведения переговоров, коммерческого характера предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абовский Н.П. Творчество: системный подход, законы развития, принятие решений. Серия «Информатизация России на пороге XXI века». М.: СИНТЕГ, 1998. 312 с.
2. Левиков Г.А., Шермухамедов А.Т. Международные смешанные перевозки грузов. М., 1993. 143 с.
3. Модели и методы теории логистики: Учеб. пособие / Под ред. В.С. Лукинского. СПб.: Питер, 2003. 176 с.
4. Радионов А.Р., Радионов Р.А. Логистика: Нормирование сбытовых запасов и оборотных средств предприятия: Учеб. пособие. М.: Дело, 2002. 416 с.
5. Семененко А.И., Сергеев В.И. Логистика. Основы теории: Учебник для вузов. СПб.: Союз, 2003. 544 с.

Клочков Виктор Николаевич –
доктор экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Организация перевозок и управление на транспорте»
Саратовского государственного технического университета

Гусев Сергей Александрович –
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте»
Саратовского государственного технического университета

Логинов Николай Константинович –
соискатель кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте»
Саратовского государственного технического университета

Г.В. Лобачева

ЛЕКСИКО-СЕМАНТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ РОССИЯН О ВЕРХОВНОЙ ВЛАСТИ

Анализируются этимология и процесс вовлечения в языковой оборот слов, определявших верховную власть в России – «царь», «самодержец», «император», монарх»; прослеживается влияние политических, социальных и духовных факторов на содержание этих терминов.

G.V. Lobacheva

LEXICAL AND SEMANTIC ASPECTS OF RUSSIANS' NOTION OF SUPREME POWER

The Etymology and the process of involving into the language words turnover of defining the supreme power in Russia is analyzed in this article. The article tells about the genesis of terms "king (tzar)", "autocrat", "emperor". There is a review of influences of political, social and moral factors on these terms.

Государство в России всегда являлось не столько надстройкой над обществом, сколько его стержнем, системообразующим фактором бытия этноса. Жизнь людей, как каждого в отдельности, так и различных социальных групп, не только в определенные моменты была обусловлена и регулировалась политическими институтами, но и как таковая была возможна только в рамках государственности, составляя с ней единое целое. Взаимопроникновение и взаимозависимость были настолько значимы и постоянны, что государственность обрела прочные традиции, отразилась в национальном самосознании, стала одним из компонентов национальной самоидентификации, значимым фактором развития культуры, духовности, психологии народа.

Становление российской государственности, изменения в политической жизни страны, представления об этих процессах в сознании людей отражались в лексико-семантической системе русского языка. Отражая динамику общественного развития, структуру социальных отношений, лексические единицы, наряду с «вещественными факторами», становятся характерными признаками эпохи. Исторически образовавшаяся связь между звучанием слова и отображением предмета или явления в сознании носителя языка заключена в значении лексической единицы. Известный русский филолог-славист А.А. Потебня указывал в конце XIX века на наличие у простого народа тесной взаимосвязи между словом и мыслью о предмете – «... изменение слова казалось непременно изменением предмета» [43, с.158]. Поэтому появление в языке новых лексических единиц, семантическое переосмысление слов, переход их в разряд историзмов и архаизмов, изменение систем связей внутри отдельных лексико-семантических подсистем позволяет проследить эволюцию взглядов людей в исторической ретроспективе.

Наряду с основным словарным фондом, обозначающим предметы внешнего мира, живых существ, термины родства и действия, словарь любого человека содержит ряд лексических групп, отражающих внеязыковую реальность. Одна из них – общественно-политическая лексика.

В общественно-политической лексике диалектика социального развития, сознание носителей языка проявляется особенно четко. Отражая социальные процессы, явления в языке могут расцениваться и интерпретироваться как свидетельства и доказательства общественных феноменов и изменений. Изучение истории отдельных слов и анализ их речевых употреблений позволяет определить, когда в ходе исторического развития то или иное общественное явление было осмыслено и обозначено как понятие.

Под влиянием социальных факторов происходили движения в словарном составе, стилистике речи, причем особенно активной и изменчивой была общественно-политическая лексика. Важное место в этой лексико-семантической подсистеме русского языка занимала терминология верховной власти.

В формировании синонимического ряда определений верховной власти принимал участие весь народ, хотя решающее воздействие оказывала, безусловно, политическая и интеллектуальная элита общества. Руководствуясь своей системой ценностей, социальные группы по-разному интерпретировали языковые знаки. На уровне лексики идеологизированность трансформировалась в виде того или иного сочетания свойств слов, в виде оценочного компонента их значения. Так в России, начиная с XV века, постепенно складывался социальный стереотип восприятия главы государства, воплощенный в слове «царь».

Это слово было заимствовано еще до окончательного распада общеславянского языка [77, с.143]. Оно пришло через готское «káisar» – «император» [75, с.291; 7, с.93]. Древнерусским языком слово «цѣсарь» было воспринято после принятия христианства от болгар, где «цар» использовалось при титуловании правителей [45, с.1183; 6, с.675]. В письменных памятниках XI и XII веков оно изображалось «цср» – «цесарь», впоследствии «с» под титлом исчезло и получилось «црь» – «царь» [22, с.138]. Подобные сокращения были обычными при титуловании [45, с.1183].

Высказывалось предположение, что слово имеет более древнее происхождение, восходя корнями к ассирийскому «sar» (сар) – «правитель». Во время походов Александра Македонского оно вошло в греческий лексикон. Распространенное в Македонии именно в этом варианте (а не производное греческое «хатсар»), как обозначающее могущественного и самовластного правителя, слово было затем использовано Кириллом и Мефодием при переводе Священного Писания на славянский язык [63, с.44-45]. Хотя эта гипотеза маловероятна, но привлекательна возможностью объяснить существование параллельно в древнерусском языке слов «царь» – «цесарь», «царевич» – «цесаревич». Более того, если слово «царь» не имело отношения к римской имперской традиции, то его смысловой оттенок менялся – скорее «восточный деспот», нежели «император». Заслуживает внимания и тот факт, что собственно византийцы царем называли только правителя Персии, но никак не римских императоров.

В письменных памятниках средневековья, наряду со словом «царь», встречается и «кесарь». Оно использовалось исключительно для обозначения римских императоров [63, с.43], в то время как «царь» могло служить для обозначения правителя вообще. Противопоставление «цесаря» и «кесаря» (Супральская рукопись евангельского текста, Изборник 1073 года, Мстиславово евангелие XII века) подметил Ю. Лотман, посчитав это свидетельством противопоставления византийской власти [29, с.202], оттенявшим ориентацию Киевской Руси на Византию, а не на Рим.

Первоначально термин «царь» применялся к государям, упоминавшимся в Священном писании, к византийским императорам, восточным властителям: «Радуйся, царь Иудейский» (Евангелие от Матфея, Остромирово евангелие, 1056/1057 год) [цит. по 69, стлб.1462], «Бысть в Грецах царь, именем Михаил» (Четвертая новгородская летопись, 637 год) [69, стлб.1434]. Вряд ли можно согласиться с мнением М.В. Ильина, который считает, что титул царя использовался нашими предками прежде всего для обозначения властителя, в чью империю попадала Русь [18, с.233]. В.О. Ключевский отмечал, что с XI века некоторых русских князей называли иногда царями в виде почетного отличия [22, с.138] (но это не подразумева-

ло, как считает А.И. Филюшкин, никакого религиозно-идеологического содержания) [76, с.145]. И.И. Срезневский находил подтверждение этому в письменных источниках XII века: «Аз раб божий недостойный, худый, грешный списах памяти дела царю нашему» (Мстиславово евангелие, 1117 год) [69, стлб.1462]. В позднейших летописных сводах царем называли Владимира Мономаха, Мстислава Галицкого [33, с.904; 50, с.552], но, по мнению М. Б. Плюхановой, авторы письменных памятников XV–XVI веков отличали князей Киевской Руси от московских царей – Мономах только «наречеса царь и Мономах» [39, с.188].

П.Я. Черных относит к XIII веку использование термина «царь» как название татарских ханов [77, с.211]. Это не было случайностью, поскольку значение слова изначально включало в себя такие семантические признаки как «старший», «властвующий», «сильный», «могучий», «верховный правитель» [15, с.571], то есть власть более «высокая» по сравнению с властью удельных правителей. Закономерно, что хан Золотой Орды, считавшийся правителем более высокого ранга, чем русские князья, назывался царем [23, с.369-370; 1, с.89] (В.В. Колесов видит в этом отчасти недоразумение – произношение этого слова совпало с соответствующим тюркским определением к титулу владыки земли и неба) [25, с.269]. Широко использовалось слово «царь» как название верховной власти других государств и в дальнейшем (Кучум – царь сибирский, например), в то время как слово «государь» употреблялось, как правило, при наименовании русских верховных правителей [77, с.214].

Постепенное возвышение московских великих князей, складывание единого государства, обретение Московской Русью независимости изменило суть верховной власти. «Из-под великокняжеской вотчины, – писал К.Д. Кавелин, – проглядывает государство, отвлеченное нравственное лицо, имеющее свое физическое существование и самостоятельное, разумное значение» [19, с.48]. Глава этого государства – единоличный, наследственный правитель территории, занимаемой русским народом, политически независимый и самостоятельный. Такое содержание и вкладывалось в слово «царь» [64, с.176-178].

По мнению С.Ф. Платонова, перелом в народном сознании произошел в XV веке – литературные источники называют Дмитрия Донского уже не только князем московским, но и «царем Русским» [38, с.196]. В.О. Ключевский считал, что на политическом языке Московской Руси XV-XVI веков слово «царь» означало не государя с неограниченной внутренней властью, а властителя, независимого ни от какой сторонней внешней власти, никому не платящего дани [21, с.123]. В современной литературе высказывается иное мнение: титул «царь» означал, что его носитель – единственный, возвышающийся надо всеми неполноправными подданными – министрами, правитель [8, с.47]. В.О. Ключевский в данном случае очевидно ближе к истине, ведь титул царя Иван III начинал использовать, только перестав быть данником хана.

Включенное в официальный титул московских государей слово «царь», по мнению ряда исследователей, несло и еще одну смысловую нагрузку – переход к Москве византийского императорского наследия, заявка на статус «Христианского царя» [72, с.26; 2, с.12-25; 30, с.30-33; 8, с.29]. Вряд ли это в полной мере осознавалось Иваном III, женившимся на племяннице последнего византийского императора Софье Палеолог. Уместнее в таком случае было бы заимствовать слово «василевс». С.Ф. Платонов подчеркивал, что увлечения византийскими идеалами в то время, когда строй, их воплощавший, терпел крушение, среди русских людей быть не могло [38, с.198]. Новое же явление в общественно-политической мысли – теория Филодея «Москва – третий Рим», проанализированная затем русскими философами и публицистами, – добавило позже еще один «идеологический» компонент в значение термина «царь», что характерно для политической лексики. В сознании же московских государей, как и всех русских людей, сомнительные лавры рухнувшей Византийской империи уступали по весомости наследию орды. Не случайно Иван IV первостепенное значение придавал завоеванию государств – ее преемников – Казанского и Астраханского ханств. Русским послам предписывалось на возражения против русского царского титула отвечать:

«... А наши государи от начала по своему государству по Русскому зовутца цари, которые венчаются... и государь наш ныне, з Божьею волею, пишется царем Русским и Казанским...» [Цит. по 51, с.297]. В ряде памятников взятие Казани рассматривалось как прямое следствие принятия Иваном IV царского титула или же дата принятия титула смещена и уже сама напрямую связывалась с покорением Казанского ханства [76, с.146].

Иван IV, венчавшись на царство (1547 год), включил слово «царь» в титул: «Бога в Троице славимого милостью, Великий Государь, Царь и Великий Князь...». Петр I в 1721 году заменил «царь» на «император» и слово сохранилось только в четвертой части титула: «...Царь Казанский, Царь Астраханский, Царь Польши, Царь Сибирский, Царь Херсониса Таврического, Царь Грузинский...» (формулировка, утвержденная Николаем I в 1825 году и существовавшая до 1917 года) [53, ст.37, с.7-8].

Наряду со словом «царь» в политическом лексиконе россиян для обозначения носителя верховной власти использовалось слово «самодержец». Имея в основе корень «dher~», широко распространенный в индоевропейских языках [44, с.503], старославянское «дръжж» – «держатель» [73, с.503], сохранив, как считает М.В. Ильин, основополагающие исходные смыслы прочности, крепости, надежности [18, с.224], породило слова «держатель», «держальник», «державец» со значениями, во-первых, «собственник», «владелец»; во-вторых, «властелин», «правитель». Во втором из указанных значений эти слова и их производные довольно часто употреблялись средневековыми авторами: «Великий в князях князь Святослав, вжделанием зело вжделав, држдаливый владыка» (Изборник 1073 года) [Цит. по 68, стлб.777], «При благороднем князи Всеволоде, державному Русьскыя земля и чадом его Володимера и Востислава воеводство держащу...» (Повесть временных лет, под 1089 годом. Список 1377 года) [28, с.208]; «Мы ли хотим подручники быти московскому держателю и его князем» (История о Казанском царстве – Казанский летописец. Список XVI-XVII вв.) [42, с.65]; «И отписал бы князь Данило в Оршу к державцу, кому ныне в Орше приказано» (из дипломатического документа 1582 года) [Цит. по 58, с.232].

Для указания на полновластие того или иного князя вводилось уточняющее «едино~» – «Единодержец быв земли своем» («Слово о законе и благодати» митрополита Иллариона) [68, стлб.812]. Позже возникало сложное слово, в котором корень «держ~» соединялся с корнем «сам~» (в индоевропейских языках «sem» – «один»), имеющим значение «истинный», «подлинный», «настоящий», а с прилагательным выражающий превосходную степень [44, с.248], то есть, «самый властный». И.И. Срезневский приводил примеры использования этого слова в письменных источниках: «И толико лети мнози же самодержици придоша, держащие стол княжения Киевского, и того же боголюбиваго Всеволода иже созда церковь ту...», «По смерти же великаго князя Романа, приснопамятного самодержца...» [69, стлб.249].

В политической практике термин «самодержец» начал применяться при Иване III – во время венчания на царство в 1498 году его внука уже звучало «преславный царь самодержец» [24, с.7]; к Василию Ивановичу Иосиф Волоцкий (1515 год) обращается: «Благородному и христоролюбивому самодержцу, царю и государю всея Руси» [Цит. по 69, стлб.249]. В вовлечении в оборот новой лексической единицы В.О. Ключевский видел след византийского влияния [22, с.138]. Желание подчеркнуть преемственность и оттенить значение русской верховной власти авторитетом византийских императоров натолкнуло на мысль использовать в новом качестве уже известное слово «самодержец», тем более, что оно соответствовало греческому «αὐτοκράτωρ» («αὐτός» – «сам», «κράτος» – «власть»), означавшему «император».

В то же время В.О. Ключевский считал, что первоначально под термином «самодержец» подразумевалась независимость русской верховной власти от других государств, а не внутреннее полновластие [22, с.139]. Эта точка зрения, получившая распространение в дореволюционной историографии [24, с.4], имеет хождение и сегодня [3, с.16; 9, с.625], хотя вряд ли с ней можно безоговорочно согласиться. Маловероятно, чтобы лексическая единица с уже сложившимся содержательным компонентом вдруг на некоторое, причем краткое время (уже

при Иване Грозном самодержавие понимается как неограниченная власть) [16, с.162], меняла свое значение. Тем более, что одновременно вошедшее в обиход слово «царь» уже несло подобную смысловую нагрузку – правитель суверенного государства. Включение в активный политический лексикон, а затем, начиная с Федора Ивановича, и в титул верховной власти слова «самодержец» – «Божиею милостию Государь Царь и Великий Князь всеа Русии Самодержец» [11, с.143], отражало проявление абсолютистской тенденции в развитии российской государственности. Этот термин со времени включения в титул и до 1917 года сохранял свое место как в третьей части полного титула, выражавшей суть власти – «Божею поспешествуя милостью, мы, NN, Император и Самодержец Всероссийский...», так и в кратком его варианте [53, ст.37, с.7; 17, с.97]. Даже Петр I, кромсая со свойственным ему реформаторским задором старую формулировку титула, не покусился на слово «самодержавие». Именно оно, вероятно, в наибольшей степени отражало то понимание природы российского государства, которое сложилось в общественном сознании.

С именем Петра I связано появление в политическом лексиконе слова «император». От латинского «*imperator*» – «повелитель», «полководец» [74, с.129], первоначально обозначавшего военачальника, одержавшего блестящую победу и облеченного высшей властью с правом суда и командования; это слово уже в Восточной римской империи понималось как «единовластие» и переводилось соответственно «*αὐτοκράτωρ*».

На русский язык слово «император» переводилось как «самодержец» («Книга глаголемая алфавит, Сказание о всяких вещех и иностранных речей...», XVII век) [58, с.231]. Вероятно, под влиянием иноязычной среды использовал это слово в своих письмах князь А. Курбский: «Неудобно бывает человеку грубому и неученому, и еще к тому умом врежденному, императором быти» [65, с.411]. Но русских государей титул «императора» не прельщал; «царь», расценивавшийся как более универсальный, вполне удовлетворял их амбиции.

Термин был востребован новой реформаторской эпохой. Стремясь стать полноправным и авторитетным участником европейской политики, Петр I после подписания Ништадтского мира со Швецией принял в 1721 году титул императора Всероссийского. Обосновывая правомерность нового наименования, канцлер Г.И. Головкин в торжественной речи сказал, что «...титул Императорский Вашего Величества достохвальным Анцессором от славнейшаго Императора Римскаго Максимилиана, от нескольких сот лет уже приложен, а ныне от многих Потентантов дается... дерзаем Вам приложить по прикладу древних Греческих и Римских Синклитов, которые своими славными делами и милостию прославившимся Монархам оное прилагали» [41, № 3840, с.444-445]. Стереотип предшествовавшей культуры – ориентация на римско-византийские традиции – вновь проявил себя, но выразился по-новому. Термин также подчеркивал переход России в иное качество – «империи» [26, с.127; 80, с.21], свидетельствовал о завершении процесса формирования российского абсолютизма [31, с.14], декларировал «западничество» Петра I [30, с.31]. Ю.М. Лотман считал, что это был прежде всего акт культурной переориентации – титулы «царь» и «император» воспринимались не как синонимы, а в качестве своего рода антонимов, отражая языковыми средствами столкновение сознания двух эпох [29, с.202-203]. Интересно, что жена и дочери Ивана Алексеевича продолжали именоваться соответственно «царица», «царевны», в то время как императрица называлась уже «цесаревино величество», а дочь Петра – «цесаревна» [29, с.202-203]. Начиная с Петра I, предложившего новую формулировку титула, «император» – одно из двух ключевых слов, наряду с «самодержец», определявших существеннейшие признаки российской верховной власти.

Русский язык в XVII–XVIII веках, в силу своей ненормированности, был открыт для различного рода внешних влияний. Одним из заимствований этого периода стало слово «монарх» [57, с.383], произошедшее от греческих слов «*μόνος*» («один») и «*αρχή*» («власть»). Термин «монарх» трактовался как «самодержец» [52, с.198], «единовластитель» [55, стлб.845]. Первоначально этим словом именовали правителей иностранных государств [59,

с.258], позже стали применять и по отношению к российским государям. Слово «монарх» не вошло в титул, но использовалось как официальное определение верховной власти: «Император Всероссийский есть монарх самодержавный и неограниченный» [53, ст.1, с.2].

Обзор этимологии терминов, зафиксировавших представления русского народа о верховной власти, анализ содержания понятий показывают, что явления политической жизни накладывали отпечаток на лексико-семантическую систему языка. Генезис российской государственности, тенденции этого процесса, как реализованные, так и сошедшие на нет, взгляды общества, идеологические концепции – все это облекалось в словесные оболочки. Лексика не могла не отразить и столь значимый для народа феномен, как верховная власть. Эволюция в общественном сознании представлений о функциях правителя фиксировалась языковыми коррелятами, часть которых затем кодифицировалась в качестве государственно-правовых терминов. Существенную роль в этом процессе играл носитель верховной власти. Руководствуясь собственным пониманием, политической конъюнктурой, учитывая международные факторы и мнения своего окружения, правитель мог использовать то или иное наименование, внедряя его через нормативные документы и информационные каналы в общественное сознание. Но чаще все же было наоборот. Реальная практика определяла выбор тех или иных лексических единиц, обуславливая вторичную контаминацию известных слов и заимствование иноязычных терминов. Будучи однажды включены в политический дискурс, термины, определявшие представление русского народа о верховной власти, последовательно доминировали, в дальнейшем они, как правило, не исчезали, а лишь оттеснялись, выстраивались, как бы по ранжиру, друг за другом.

Развитие общественно-политической лексики, в том числе и словопонятий, определявших верховную власть, осуществлялось за счет изменений в значениях терминов – обогащения, расширения или переосмысления их содержания. Интенсивная общественная жизнь, характерная для рубежа XIX-XX веков, существенно меняла языковые привычки и вкусы, особая подвижность отличала политические идеалы массовой коммуникации. Судить об этом позволяет анализ соответствующих статей толковых словарей.

Термин «царь», отшлифованный веками, как никакой другой, обладал устойчивым содержательным компонентом. Ни конъюнктурные соображения, ни политическая целесообразность не изменили суть понятия. Толковые словари XIX – начала XX веков однозначно трактовали термин как носитель «верховой власти». В.И. Даль, уточняя признаки этого понятия, употреблял прилагательные «сильный, могучий, старший» [15, с.571].

Трактовка в толковых словарях термина «самодержец» отразила становление государственной идеологии. В «Российском Целлариусе» (1771 год), где соответствующая статья впервые появилась, говорилось, что самодержец – обладатель неограниченной власти [62, стлб.129]. Либеральные стремления молодого Александра I предоставили благоприятные возможности для обсуждения проблем будущего политического и общественного устройства России. Плодом просвещенческих усилий стал проект М.М. Сперанского. Подчеркивая необходимость юридического оформления государственного устройства, он предлагал «...облечь правление самодержавное всеми, так сказать, внешними формами закона, оставив в существе его ту же силу и то же пространство самодержавия» [66, с.103]. Наряду с реформаторской, в общественной мысли проявилась и охранительная тенденция. Н.М. Карамзин в «Записке о древней и новой России в ее политическом и гражданском отношениях» (1811 год) предпринял попытку историсофского осмысления самодержавия. Он писал, что над всеми «... государь, единственный законодательный источник власти. Вот основание российской монархии, которое может быть утверждено или ослаблено правилами царствующих» [20, с.103]. Официальная идеология самодержавия, отторгая реформаторские, была восприимчива к консервативным предложениям. «Словарь Академии Российской...» в духе Н.М. Карамзина пояснял: «Самодержавие – власть самодержца, управление самовластное государством; самовластный,

законодательную власть в себе заключающий», «Самодержец – государь, самовластно, не завися ни от кого, управляющий» [56, стлб.19].

Незыблемость существовавшего строя во главе с самодержавным и неограниченным монархом подтвердил «Свод законов в Российской Империи». Обоснованное в процессе кодификации право на самодержавную власть идеологически было подкреплено емкой формулой «Православие. Самодержавие. Народность», прозвучавшей впервые в 1832 году в докладе товарища министра народного просвещения С.С. Уварова императору Николаю I. Идеологические установки национально-охранительного характера надолго определили содержание статей в толковых словарях. В словаре середины 60-х годов, эпохи «великих реформ», «самодержавие» также трактовалось, как «...верховная власть, неограниченная никакими палатами и учреждениями...», а «самодержец» – «государь, управляющий полновластно, ни от кого независимо» [34, с.391]. Как бы вопреки надеждам западников на конституцию и предложениям славянофилов о единении царя с «землей», «Русский энциклопедический словарь», сверх обычных пояснений, указывал, что «...русский император не разделял своих верховных прав ни с какими установлениями, или сословиями в государстве, то есть что каждый акт его воли получает обязательную силу независимо от согласия другого установления» [49, с.435]. В словаре В.И. Даля, в его втором издании, увидевшем свет в начале 80-х годов XIX в., когда политическая реакция восторжествовала, консервативная идея выражена еще доходчивее: «самодержавное управление» определено не только как монархическое, полновластное, неограниченное, но и «...независимое от государственных учреждений, соборов или выборных от земств или чинов» [15, с.133]. В последней четверти XIX века вопрос о природе самодержавия был одним из наиболее актуальных. Политический консерватизм обогатился идеями позднего славянофильства, «русского византизма» К.Н. Леонтьева, «собирания» власти М.Н. Каткова. Официальные идеологи пореформенной эпохи находили корни самодержавия в «...не ясно сознаваемой потребности русского народа в твердой власти...» [78, с.12], в национальном характере, народном духе и религиозном мирозерцании нации [70, с.68; 71, с.462], в «...единстве духовного самосознания между народом и правительством...» [40, с.205], в потребности обуздать общественные стихии [79, с.569], в «...органичности всего строя народной психологии, устремленности нации к высшим духовным ценностям» [13, с.9,30,46]. Отвечая на потребность общества в осмыслении сложнейшего политического понятия, словарь Брокгауза и Эфрона с учетом теоретических разработок и публицистических настроений давал обстоятельную историческую справку о становлении самодержавия в России, раскрывал его суть как власти абсолютной и неограниченной [82, с.206]. Видимо, в подборе синонима – «абсолютизм» – проявилось влияние времени, поскольку это понятие широко использовалось в политической практике того периода для проведения параллелей с развитием государственности в Европе.

Идея самодержавия была в центре политического противостояния начала XX века. Вопрос о титуле «самодержец» стал камнем преткновения развернувшейся в годы первой русской революции дискуссии. Преобразования внутреннего строя империи после Манифеста 17 октября 1905 года неизбежно вели к ограничению верховной власти. Николаю II трудно было согласиться с потерей прерогатив, зафиксированных в государственно-правовых терминах. Особое совещание в Царском Селе с участием царя 7 и 9 апреля 1906 года обсуждало формулировку статьи новой редакции «Основных государственных законов» [См.: 27, с.291]. Подготовленное к заседанию С. Князьковым историческое изыскание, предпринятое по заказу С.Ю. Витте, смягчало столь существенную для императора потерю. По мнению автора, власть могла и впредь называться самодержавной, поскольку это означало государственную независимость [24, с.37]. Ряд правоведов присоединился к этой точке зрения. Б.Б. Глинский указывал на сохранение наследственного права у российского императора [10, с.601], позже В.М. Грибовский, подводя итоги дискуссии, пояснял, что самодержец являлся носителем государственной власти, все функции которой замыкались в его Особе [12, с.25].

Все же слово «неограниченный» из статьи I новой редакции «Основных государственных законов» исчезло [46, с.44]. Официальная идеология, скрадывая нанесенный революцией удар по царскому режиму, вновь с усиленной энергией пропагандировала теорию «народного самодержавия», акцентировала внимание на связи царя с народом. В «Новом энциклопедическом словаре» пояснялось, что «...русское государство остается верным в течение целого ряда столетий своим чисто народным основам..., сохранению идеи народного самодержавия» [35, с.550]. В соответствии с политическими реалиями в «Энциклопедическом словаре» Ф. Павленкова говорилось, что верховная власть императора России ранее была неограниченной; но с 1905 года совместно с ней действует законодательная власть Государственной думы и Государственного совета [83, стлб.2234].

Термин «император», в отличие от «самодержец», никакой двусмысленности не сохранил. В толковые словари он включался с 1731 года [60, стлб.306]. «Словарь Академии Российской...» трактовал его как титул государя [54, с.1141]. Словарь А. Старчевского, кроме этого, указывал на историческую преемственность термина («...от нескольких сот лет уже приложен...»), на религиозную подоплеку («христолюбивый государь»), на важнейшие функции этой формы власти – законодательную и административную, на специфику России, где император самодержавный и неограниченный [67, с.92]. «Русский энциклопедический словарь» (том увидел свет в 1877 году, когда идея славянского единения была столь актуальной) акцентировал внимание на том, что «...император – титул главы государства с обширными территориями» [47, с.378]. В.И. Даль, приводя понятную для широкого круга читателей формулировку, использовал как синонимы слова «властелин», «правитель» с уточнением «неограниченный», «высший по сану» [14, с.42]. «Большая энциклопедия» в исторической справке подчеркивала, что Петр I – законный преемник восточно-римских императоров, в то время как среди 11 монархов, имевших тогда (1902 год) этот титул, были и не легитимные [4, с.55]. Отличием статьи «Нового энциклопедического словаря» было упоминание об исключительности и священной природе императорской власти, дающей авторитет над совестью подданных и над церковью [36, с.279]. Подобное напоминание было не лишним в беспокойные послереволюционные годы.

Слово «монарх» впервые было зафиксировано Ф. Поликарповым в 1704 году («Лексикон трехязычный, сиречь речений славянских, еллипогреческих и латинских сокровище») [61, стлб.1704]. Из издания в издание толковые словари поясняли, что это глава государства, причем в Российской Империи его власть неограниченна и самодержавна [48, с.350; 5, с.334]. Но реальная политическая жизнь и в эту словарную статью внесла свои изменения. Сравним два варианта, разделенных десятилетием. В «Энциклопедическом словаре» Брокгауза и Ефрона (том опубликован в 1896 году) указывалось, что монарх пользуется властью милостию Божией по собственному праву, не делегированному ему никакой другой властью [81, с.701]. «Новый энциклопедический словарь» (том опубликован после первой русской революции), отражая повышенный общественный интерес к проблеме государственной власти, указывает, что монархия есть одна из древних и наиболее жизненных политических форм, подчеркивает, что своим возникновением часть монархий обязана акту избрания (приводится пример избрания Михаила Романова). Симптоматично, что никаких рассуждений о власти «Божьей милостию» нет, более того, написано, что «...монарх – должностное лицо, стоящее во главе государства, он не собственник государственной власти, а ее орган». Интересно и рассуждение о том, что неограниченная монархия и управление на твердых основаниях законов несовместимы, «...ибо ни одна в мире власть не может добровольно ограничить себя своими собственными, более ранними предписаниями, если только ими не созданы учреждения, ее фактически сдерживающие» [37, с.31]. Во второй половине XIX века возникло производное от «монарх» – слово «монархизм». «Настольный словарь для справок по всем отраслям знания, издаваемый Ф. Толлем» (1863 год) содержал первое определение этого термина – «...система единодержавия и приверженность к ней» [32, с.904]. После первой русской рево-

люции словари включают уже отдельные статьи о монархистах [37, с.29; 83, стлб.1451]. Новые слова, выражавшие первоначально доступный лишь для немногих смысл, в 1910-е годы стали носителями общего широкого значения, понятного большинству общества.

Динамичная эпоха рубежа XIX–XX веков породила и интенсивные языковые переживания. Коррекция ценностных установок, изменения общественных взглядов накладывали отпечаток на языковые вкусы и привычки. Это нашло отражение в толковых словарях, но, в еще большей степени – в литературной и разговорной практике.

Разнообразие терминов, определявших верховную власть, обилие семантических оттенков, порожденных специфическими чертами и особенностями российской государственности, свидетельствовали о значительной роли, которую играло государство в жизни людей.

Присущее любому народу стремление структурировать представления об окружающем мире, локализовать источник добра и воплотить его в образ покровителя, в конкретных исторических условиях способствовало кристаллизации монархического идеала. Царь как символ порядка, посредник между сообществом и внешним миром являлся неотъемлемой частью картины мира россиян. Образ верховной власти отложился в социальной памяти, был освоен патриархальным мифологизированным сознанием, стал одним из стержневых в культурной традиции.

Часть населения современной России во многом сохраняет нравственно-психологические настроения крестьянского мира, поэтому патриархальная культура – не только осколок прошлого, но и атрибут настоящего. Способ восприятия действительности, образ мыслей, а, следовательно, и поведение современного человека в значительной степени определяются нравственно-психологическими установками традиционного. И сегодня в процессе государственного строительства, с одной стороны, нельзя не учитывать ценных свойств традиционной власти, обеспечивавшей стабильность политической структуры на протяжении нескольких столетий и служившей элементом этнической солидарности. С другой стороны, нельзя не замечать всплеск общественного интереса к монархической тематике. В ходе детального изучения монархической традиции и воссоздания образа верховной власти, существовавшего в массовом сознании столетие назад, вероятно, могут быть не только уточнены некоторые аспекты истории российской государственности, но и выявлены современные ориентационные рефлексy этноса.

ЛИТЕРАТУРА

1. А было ли иго? Круглый стол // Родина. 1997. № 3-4. С.88-90.
2. Алексеев Ю.Г. Россия и Византия: конец ойкумены // Вестник Санкт-Петербургского университета. История, языкознание, литературоведение. 1994. Сер.2. Вып.1. (№ 2). С.12-25.
3. Бахтурина А. Бремя, а не привилегия // Родина. 1996. № 10. С.14-17.
4. Большая энциклопедия. Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания / Под ред. С.Н. Южакова. СПб., 1902. Т.10. 794 с.
5. Большая энциклопедия. Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания / Под ред. С.Н. Южакова. СПб., 1903. Т.13. 794 с.
6. Большая энциклопедия. Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания / Под ред. С.Н. Южакова. СПб., 1906. Т.17. 794 с.
7. Буслаев Ф. Историческая грамматика русского языка. М., 1863. Ч.1. 260 с.
8. Власть и реформы. От самодержавной к советской России. СПб.: Изд-во «Дмитрий Буланин», 1996. 820 с.
9. Гессен В. Самодержавие и манифест 17 октября // Полярная звезда. 1906. № 9. С.623-634.
10. Глинский Б.Б. К вопросу о титуле «самодержец» (Из истории кодификации основных законов в 1906 году) // Исторический вестник. Т.СXXXI. С.567-601.

11. Градовский А.Д. Начало русского государственного права. СПб., 1892. Т.7. 441 с.
12. Грибовский В.М. Государственное устройство и управление Российской Империи (Из лекций по русскому государственному и административному праву). Одесса, 1912. 258 с.
13. Д.Х. (Хомяков Д.) Самодержавие (Опыт схематического построения этого понятия). М., 1903. 58 с.
14. Даль Вл. Толковый словарь живого великорусского языка / Набрано и напечатано со второго издания 1880-1881 гг. М.: Гос. изд-во иностр. и нац. словарей, 1955. Т.2. 780 с.
15. Даль Вл. Толковый словарь живого великорусского языка / Набрано и напечатано со второго издания 1880-1881 гг. М.: Гос. изд-во иностр. и нац. словарей, 1955. Т.4. 684 с.
16. Золотухина Н.М. Развитие русской средневековой политико-правовой мысли. М.: Наука, 1985. 180 с.
17. Ивановский В.В. Русское государственное право. Т.1. Верховная власть и ее органы. Казань, 1896. Ч.1. 220 с.
18. Ильин М.В. Слова и смыслы. Опыт описания ключевых политических понятий. М.: Российская политическая энциклопедия, 1997. 432 с.
19. Кавелин К.Д. Взгляд на юридический быт древней России // Кавелин К.Д. Наш умственный строй. М.: Правда, 1989. С.11-67.
20. Карамзин Н.М. Записка о древней и новой России в ее политическом и гражданском отношении. М.: Наука, 1991. 127 с.
21. Ключевский В.О. Курс русской истории. Лекция XXVI // Сочинения. М.: Соцэргиз, 1956. Т.2. 230 с.
22. Ключевский В.О. Терминология русской истории. Лекция I // Сочинения. М.: Соцэргиз, 1959. Т.6. С.129-143.
23. Князев Е. А. Родная старина. Слова, термины, образы. М.: Остожье, 1996. 396 с.
24. Князьков С. Самодержавие в его исконном смысле. СПб., 1906. 37 с.
25. Колесов В.В. Мир человека в слове Древней Руси. Л.: Лениздат, 1986. 282 с.
26. Коржихина Т.П., Сенин А.С. История российской государственности. М.: Наука, 1995. 230 с.
27. Кризис самодержавия в России. 1895-1917. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1984. 664 с.
28. Лаврентьевская летопись. Вып. 1-2 // Полное собрание русских летописей (Воспроизведение текста издания 1926-1928 гг. Изд.2), М.: Наука, 1962. Т.1. 340 с.
29. Лотман Ю.М. Отзвуки концепции «Москва – третий Рим» в идеологии Петра Первого (к проблеме средневековой традиции в культуре барокко) // Избранные статьи в трех томах. Таллинн, 1993. Т.3. С.201-212.
30. Махнач В. Бремя Третьего Рима // Родина. 1995. № 9. С.30-33.
31. Мозговая Е.Б. Образ Петра I – императора в произведениях Бартоломео Карло Растрелли // Монархия и народовластие в культуре просвещения. М., 1995. С.3-16.
32. Настольный словарь для справок по всем отраслям знания, издаваемый Ф. Толлем. СПб., 1864. Т.2. 1010 с.
33. Настольный словарь для справок по всем отраслям знания, издаваемый Ф. Толлем. СПб., 1864. Т.3. 1020 с.
34. Настольный словарь для справок по всем отраслям знания, издаваемый Ф. Толлем. СПб., 1864. Вып. XI. 1171 с.
35. Новый энциклопедический словарь / Под ред. К. К. Арсеньева. СПб., б.г. Т.14. 600 с.
36. Новый энциклопедический словарь / Под ред. К. К. Арсеньева. СПб., б.г. Т.19. 420 с.
37. Новый энциклопедический словарь / Под ред. К. К. Арсеньева. СПб., б.г. Т.27. 260 с.

38. Платонов С.Ф. Лекции по русской истории. М., 1993. 736 с.
39. Плюханова М.Б. Сюжеты и символы Московского царства. СПб., 1995. 336 с.
40. Победоносцев К.П. Великая ложь нашего времени. М., 1993. 280 с.
41. Полное собрание законов Российской Империи. (Собрания I – III). СПб. (Пг.), 1830-1916. Т.6.: 1720-1722. 600 с.
42. Полное собрание русских летописей. СПб., 1903. Изд.1. Т.19. 230 с.
43. Потебня А.А. Мысль и язык // Потебня А.А. Слово и миф. М., 1989. С.17-200.
44. Преображенский А.Г. Этимологический словарь русского языка. М., 1959. Т.1. 717 с.
45. Преображенский А.Г. Этимологический словарь русского языка. М., 1959. Т.2. 1284 с.
46. Российское законодательство X–XX веков. М., 1994. Т.9. 380 с.
47. Русский энциклопедический словарь, издаваемый И.Н. Березиным. СПб., 1877. Отд. II. Т.2. 500 с.
48. Русский энциклопедический словарь, издаваемый И.Н. Березиным. СПб., 1875. Отд. III. Т.2. 480 с.
49. Русский энциклопедический словарь, издаваемый И.Н. Березиным. СПб., 1875. Отд. IV. Т.1. 600 с.
50. Русский энциклопедический словарь, издаваемый И.Н. Березиным. СПб., 1878. Отд. IV. Т.3. 600 с.
51. Савва В. Московские цари и византийские василевсы: К вопросу о влиянии Византии на образование царской власти московских государей. Харьков, 1901. 360 с.
52. Сборник 1730 года – Речения иностранные противу Словено–Российских // Сборник отделения русского языка и словесности Императорской Академии Наук. СПб., 1910, Т.88. С.1-190.
53. Свод законов Российской империи. СПб., 1892. Т.1. 620 с.
54. Словарь Академии Российской по азбучному порядку расположенный. СПб., 1814. Ч.3. 1444 стлб.
55. Словарь Академии Российской по азбучному порядку расположенный. СПб., 1814. Ч.5. 1478 стлб.
56. Словарь Академии Российской по азбучному порядку расположенный. СПб., 1814. Ч.2. 1178 стлб.
57. Словарь иностранных слов, вошедших в русский язык в Петровскую эпоху // Сборник отделения русского языка и словесности Императорской Академии Наук. СПб., 1910, Т.88. С.191-390.
58. Словарь русского языка XI–XVII вв. М.: Наука, 1980. Вып.6. 380 с.
59. Словарь русского языка XI–XVII вв. М.: Наука, 1980. Вып.9. 320 с.
60. Словарь современного русского литературного языка. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Т.5. 1918 стлб.
61. Словарь современного русского литературного языка. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1954. Т.6. 1460 стлб.
62. Словарь современного русского литературного языка. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1957. Т.13. 1516 стлб.
63. Слово «царь», его глубокая древность. Киев, 1910. 50 с.
64. Соловьев С.М. История России с древнейших времен. М.: Соцэкгиз, 1961. Кн.V. Т.9. 360 с.
65. Сочинения князя Курбского. СПб., 1914. Т.1. 480 с.
66. Сперанский М.М. План государственного преобразования (введение к уложению государственных законов 1809 г.). М., 1905. 359 с.

67. Справочный энциклопедический словарь, издающийся под ред. А. Старчевского. СПб., 1847. Т.5. 190 с.
68. Срезневский И.И. Материалы для Словаря древнерусского языка. М., б.г. (Ре-принт. изд. 1893 г.). Т.1. 1420 стлб.
69. Срезневский И.И. Материалы для Словаря древнерусского языка. М., б.г. (Ре-принт. изд. 1893 г.). Т.3. 1684 стлб.
70. Тихомиров Л.А. Единоличная власть как принцип государственного строения. М., 1897. 110 с.
71. Тихомиров Л.А. Монархическая государственность. СПб.: Российский имперский союз-орден, 1992. 680 с.
72. Успенский Б.А. Краткий очерк истории русского литературного языка (XI-XIX вв.). М.: Гнозис, 1994. 240 с.
73. Фасмер М. Этимологический словарь русского языка. М., 1986. Т.I. 576 с.
74. Фасмер М. Этимологический словарь русского языка. М., 1986. Т.II. 672 с.
75. Фасмер М. Этимологический словарь русского языка. М., 1987. Т.IV. 864 с.
76. Филюшкин А.И. Термины «царь» и «царство» на Руси // Вопросы истории. 1997. № 8. С.144-148.
77. Черных П.Я. Очерк русской исторической лексикологии. Древнерусский период. М.: Изд-во МГУ, 1956. 244 с.
78. Черняев Н. И. О русском самодержавии. М., 1895. 70 с.
79. Чичерин Б. О народном представительстве. М., 1899. 810 с.
80. Чичуров И. От какого наследства мы не отказываемся // Родина. 1996. № 5. С.17-21.
81. Энциклопедический словарь / Издатели: Ф.А. Брокгауз, И.А. Ефрон. СПб., 1896. Т.38.
82. Энциклопедический словарь / Издатели: Ф.А. Брокгауз, И.А. Ефрон. СПб., 1900. Т.56.
83. Энциклопедический словарь Ф. Павленкова. СПб., 1913. 3104 стлб.

Лобачева Галина Викторовна –

доктор исторических наук, профессор,
заведующая кафедрой «История отечества и культуры»
Саратовского государственного технического университета

ЮБИЛЕИ

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ЛЯСНИКОВ (к 60-летию со дня рождения)

7 июня 2004 года исполнилось 60 лет со дня рождения заведующего кафедрой «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки», академика Академии качества РФ, члена Ассоциации металловедов России, доктора технических наук, профессора Владимира Николаевича Лясникова.

После успешного окончания школы В.Н. Лясников поступил в Ленинградский государственный университет, который окончил в 1969 году, получив специальность физика. Трудовая деятельность В.Н. Лясникова с самого начала была связана с передовыми направлениями науки и техники, а именно – с разработкой технологий и оборудования для производства электровакуумных приборов и техники СВЧ.

С 1970 года В.Н. Лясников работал на Саратовском ПО «Контакт» в должности инженера, ведущего инженера, начальника лаборатории, начальника технологического отдела, руководителя по науке ОКБ. Его всегда отличало стремление соединить точность и теоретическую базу науки с практической направленностью производства. В 1980 году В.Н. Лясников успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1988 году – докторскую. Предложенная в этих работах методология комплексного исследования свойств пористо-порошковых покрытий различного назначения и создание на этой основе научных основ разработки технологий и специального оборудования для формирования заданных параметров покрытий путем плазменного напыления получили заслуженное признание в нашей стране и за рубежом. Стремление передать богатый научный и производственный опыт молодой смене специалистов логически привело Владимира Николаевича из производства в систему образования: в 1980 году он начал работу в Саратовском государственном техническом университете сначала на кафедре «Электронное машиностроение», а затем в 1992 году сам возглавил одну из старейших кафедр нашего университета – кафедру «Материаловедение», которая из общетехнической стала выпускающей. Обновленная кафедра стала называться «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки» и готовить специалистов в области плазменных,



лазерных и других процессов обработки материалов и нанесения покрытий концентрированными потоками энергии.

Еще в период работы на «Контакте» В.Н. Лясникова заинтересовала возможность применения специальных технологий, используемых в оборонной промышленности, в области медицины. В частности, им было предложено использовать процесс плазменного напыления для создания высокопористых покрытий из биоинертных и биоактивных материалов, а также их композиций на стоматологических имплантатах – искусственных зубных корнях. Использование имплантатов сегодня является одним из наиболее эффективных методов устранения стоматологических дефектов, однако имеет много проблем, связанных с биосовместимостью имплантатов по биомеханическим, биохимическим и другим параметрам с костной тканью. Использование плазменных покрытий позволило формировать практически любые параметры покрытий различного состава и управлять процессом в течение технологического цикла. Совместно со специалистами Саратовского медицинского университета был проведен комплекс исследований, подтвердивший правильность выбранного направления. В результате был разработан комплект имплантатов и инструментов КИСВТ-СГТУ-01, не уступающий, а по ряду параметров превосходящий лучшие зарубежные аналоги. Благодаря целеустремленности и организаторской способности В.Н. Лясникова было получено разрешение Минздравмедпрома России на серийное производство и клиническое применение имплантатов с плазменными покрытиями и сертификат соответствия, который регулярно подтверждается. В результате успешных работ по созданию комплекта В.Н. Лясниковым было сформировано новое научное направление – плазменное напыление композиционных биопокрытий с заданными свойствами и открыта новая для нашего университета учебная специальность «Биотехнические и медицинские аппараты и системы». Признанием заслуг В.Н.Лясникова в этой области стало избрание его членом УМО по данному направлению.

Актуальность и новизна направления, возглавляемого профессором В.Н. Лясниковым, подтверждается работой диссертационного совета по специальности «Электротехнология», в котором он является председателем, и успешной защитой под его руководством двух докторских и шести кандидатских диссертаций. В настоящее время готовится к защите еще несколько кандидатских и четыре докторских диссертации. При этом несколько новых кандидатских диссертаций подготовлено под руководством докторов наук, научным консультантом которых был В.Н. Лясников. В связи с этим можно говорить о формировании его научной школы.

Профессор Лясников относится к тем руководителям, которые не зацикливаются только на педагогических или научных вопросах, а активно внедряют свои разработки в практику, пропагандируют достижения своей научной школы и производственной деятельности, как в нашей стране, так и за рубежом. Свидетельством тому являются 8 дипломов с отличием, полученных выпускниками кафедры 2004 года, регулярное поощрение наградами научных работ студентов, обучающихся на возглавляемой им кафедре, прошедшие на высочайшем научном и организационном уровне 7 международных конференций по современным проблемам имплантологии, более 500 научных трудов, в том числе 30 патентов на изобретение, 50 учебных пособий, 30 монографий, ежегодное участие преподавателей кафедры, возглавляемой В.Н. Лясниковым, в грантах, российских и межвузовских научных программах. В октябре 2003 года впервые в нашем университете прошло Всероссийское совещание заведующих кафедрами Материаловедения, на котором В.Н. Лясникову было поручено возглавлять секцию вузов южного региона. Благодаря руководству В.Н. Лясникова и грамотной расстановке как старых педагогических кадров, так и пришедших в последнее время специалистов из промышленности, на лабораторной базе кафедры, которая постоянно пополняется новым оборудованием и аналитической

техникой, осуществляется производство имплантатов с плазменными биопокрытиями, которые пользуются широким спросом в стоматологических клиниках Саратова, Москвы, Воронежа, Волгограда и других городов России. Признанием международных заслуг В.Н. Лясникова является награждение комплекта имплантатов КИСВТ-СГТУ-01 серебряной медалью международной выставки «ЭВРИКА-97» в Брюсселе и выполнявшаяся в течение 2001-2003 годов работа по программе «Коперникус», финансируемой Евро-союзом.

За высокие заслуги в работе ученый совет СГТУ рекомендовал В.Н. Лясникова к присвоению почетного звания – Заслуженный деятель науки и техники России.

Профессор В.Н. Лясников полон сил и творческих планов, возглавляемый им коллектив уверенно смотрит в будущее. Поздравляя Владимира Николаевича Лясникова со знаменательным юбилеем, желаем ему здоровья и новых творческих успехов в наше нелегкое время.

Коллектив кафедры «Материаловедение
и высокоэффективные процессы обработки»

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА
«ВЕСТНИК СГТУ»**

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1 интервал на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «MS Word 97» или по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов;
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные);
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив).

Далее авторы, название статьи и аннотация повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и литература.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат .tif, .jpg, .pcd, .cdr, .eps, .wmf, .psd, .bmp, .gif). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 MS Word. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-84 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, год, том, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукописи статей представляются в редакцию с рецензией ведущего ученого кафедры.

10. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

др. // Известия РАН. Неорганические материалы. 1994. Т.30. № 5. С.678-684.

высокого давления // Известия вузов. Химия и хим. технология. 2000. Т.43. № 1. С.21-29.

10. Наночастицы меди в полиэтиленовой матрице / Г.Ю. Юрков, А.В. Козинкин, Т.И. Недосейкина и др. // Известия РАН. Неорганические материалы. 2001. № 11. С.54-62.

control are represented. Practical methods of control in bridges and machining structures are considered as well.

2. А.с. 1144774 СССР. Токарный станок / И.Р. Зацман, Л.И. Брук, С.И. Зайцев и др. // Открытия. Изобретения. 1985. № 10. С.31.

пасты будет находиться число зерен, равное:

точками микронеровностей заготовки и инструмента, равное:

ЛИТЕРАТУРА

Этот комплекс технологических операций является весьма ответственным. Непра-

2. Алексаньян И.М. Износостойкость поршневых колец // Труды Ростов. ин-та жел.-дор. трансп. Ростов-н/Д, 1975. Вып.9. С.3-5.

Случай, когда присутствует только один заряд, представлен на рис. 2. Видно, что

Байбурин Вил Бариевич –

доктор физико-математических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ, действительный член РАЕН, заведующий кафедрой
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического университета

general-purpose circuit can be used with transducers having arbitrary impedances. Implementation in practice of “current loop” in combination with statistical signal processing using analog circuits and/or digital microprocessors.

ferred here. The methods of a choice of the established capacity of separate modules are developed in this work.

Для представленных в таблице значений весов g_i , когда K_U и $S_{уст}$ «весят» одинаково, онно-справочных моделей (рис. 4), в которых обобщаются опыт и знания проектировщика по профессор кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки» заведующий кафедрой «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»

тельности, как в нашей стране, так и за рубежом. Свидетельством тому являются 8 дипломов с отличием, полученных выпускниками кафедры 2004 года, регулярное поощ-