

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук,
проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук,
проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редколлегия

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук,
проф., заслуженный деятель науки
Российской Федерации

Заместители главного редактора
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф.,
член-кор. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук,
проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск
Григорьева О.Ю.

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информаци-
онных технологий и массовых ком-
муникаций. Свидетельство ПИ №
ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс **29504**
по объединенному каталогу «Пресса
России»

© Госуниверситет – УНПК, 2013

Содержание

Естественные науки

<i>Корнеев А.Ю., Савин Л.А.</i> Особенности проектировочного расчета конических подшипников жидкостного трения.....	3
<i>Матюхин С.И., Макулевский Г.Р., Деев О.В.</i> Вольтамперная характеристика лазерного диода на основе арсенида галлия.....	9
<i>Цымай Д.В., Фроленков К.Ю.</i> Автоматизация термодинамических расчетов с использованием пакета прикладных математических программ Scilab.....	23
<i>Володин В.П., Надилов Э.Р.</i> Вариационный метод исследования процесса нагружения пологих цилиндрических оболочек.....	33

Моделирование технологических процессов

<i>Андреев Д.А.</i> Моделирование темпоральных отношений в онтологиях технологических действий.....	40
---	----

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Албагачиев А.Ю., Михеев А.В.</i> Изучение распределения температур при сверлении.....	50
<i>Вдовин С.И., Лунин К.С., Мальцев Д.Н.</i> Утонение стенки трубы при гибке по копиру.....	57

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Волкова А.Н., Торопцева Е.Л., Амбросимов С.К., Большаков А.Н.</i> Взаимосвязь между изменением условий прерывистого резания, структурой и микротвёрдостью срезаемых слоев.....	61
<i>Горленко А.О., Тополянский П.А., Тополянский А.П., Соснин Н.А., Ермаков С.А., Ерохин А.Н.</i> Технология финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента.....	66
<i>Зелинский В.В.</i> Трибомеханика пластического контакта при упрочнении валов накатыванием..	74
<i>Федоров Т.В., Волобуев К.А.</i> Анализ частотной системы регулирования кривошипного пресса.....	79

Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

<i>Жаворонков А.И., Черепенько А.П., Черепенько А.А.</i> Перекок траверсы при несимметричном нагружении пресса.....	88
---	----

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Степанова Е.Ю., Мельников В.И.</i> Инновации и наукоемкие технологии в многофункциональном холдинге по производству текстильных строп и комбинированных канатов (на примере ЗАО «Промсталь», г. Орел).....	93
<i>Киричек А.В., Морозова А.В., Василенко Ю.В.</i> Реализация инициативного проекта по разработке научно-методического обеспечения магистерских программ технического профиля.	102

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Солдаткин В.В.</i> Алгоритмы формирования и обработки информации системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника.....	110
<i>Захариков В.С.</i> Система стабилизации и наведения линии визирования с увеличенными углами наведения.....	121
<i>Богданов С.П., Басов О.О.</i> Оптимизация структуры многофункциональных беспроводных датчиков с автономным питанием.....	129

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Пахолкин Е.В., Кобзев И.О.</i> Методика и техника эксперимента исследования температуры трения при взаимодействии электрорезистивным методом.....	137
<i>Соловьев А.М.</i> Моделирование структурного контроля усилителя переменного тока.....	145



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 3 (299) 2013

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution
«State University - Education-Scientific-Production Complex»
(State University – ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidate Sc.
Tech., Assistant Prof., secretary
Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

Editor-in-chief
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS
Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
55-05-81

www.gu-unpk.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency
of supervision in sphere of commun-
ication, information technology and
mass communications. The certificate
of registration PI № FS77-47351 from
03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa
Rossii» 29504

© State University – ESPC, 2013

Contents

Natural science

<i>Korneyev A.Yu., Savin L.A.</i> The design calculation procedure of the liquid friction conical bearings.....	3
<i>Matyukhin S.I., Makulevski G.R., Deev O.V.</i> I-V curve of a laser diode on the basis of gallium arsenide.....	9
<i>Tsymay D.V., Frolenkov K.Yu.</i> Thermodynamic calculations automation with package of applied mathematics program Scilab.....	23
<i>Volodin V.P., Nadirov E.R.</i> Variation method of the study process loading gentle cylindrical shells.....	33

Process modeling

<i>Andreev D.A.</i> Modeling temporal relations in ontologies of technological actions.....	40
---	----

Construction, calculation, material

<i>Albagachiev A.Yu., Mikheev A.V.</i> Study of the temperature distribution when drilling.....	50
<i>Vdovin S.I., Lunin K.S., Maltsev D.N.</i> Tube wall tapering when bending with copying template.....	57

Machine building technology and toolware

<i>Volkova A.N., Toroptseva E.L., Ambrosimov S.K., Bolshakov A.N.</i> Interrelation between change of conditions of faltering cutting, structure and microhardness of cut-off layers.....	61
<i>Gorlenko A.O., Topolyansky P.A., Topolyansky A.P., Sosnin N.A., Ermakov S.A., Erokhin A.N.</i> The technology of finishing plasma hardening for increase in service life of cutting tools.....	66
<i>Zelinskiy V.V.</i> Tribomechanics of plastic contact for hardening shafts by roll forming.....	74
<i>Fedorov T.V., Volobuev K.A.</i> Analysis of the frequency of the system regulation of the crank press.....	79

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Zhavoronkov A.I., Cherepenko A.P., Cherepenko A.A.</i> Sag in traverses asymmetrically loading press.....	88
--	----

Innovation and frame in machine building

<i>Stepanova E.Y., Melnikov V.I.</i> Innovation and high technology in multifunctional holding on production textile and combined line rope (on the example of JSC "Promstal" Orel).....	93
<i>Kirichek A.V., Morozova A.V., Vasilenko Yu.V.</i> Enterprising project realization for scientific-methodical support of master's engineering programs.....	102

Instrument making and biotechnological system

<i>Soldatkin V.V.</i> Algorithms of formation and information processing of system of air signals of the helicopter on the basis of the motionless multipurpose aerometric receiver.....	110
<i>Zakharikov V.S.</i> System stabilization and guidance a line of sight with increasing angles guidance.....	121
<i>Bogdanov S.P., Basov O.O.</i> Optimization of structure of multifunctional wireless devices with autonomous power supply.....	129

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Pakholkin E.V., Kobzev I.O.</i> Experimental methods and techniques temperature friction study of interaction by electric method.....	137
<i>Solowjev A.M.</i> Modeling of structural control for the alternating current amplifier.....	145

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

УДК 621.822

А.Ю. КОРНЕЕВ, Л.А. САВИН

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВОЧНОГО РАСЧЕТА
КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ**

Рассмотрен вопрос проведения проектного расчета радиально-упорных подшипников с коническими опорными поверхностями, предполагающий определение геометрических параметров, а именно, диаметров и углов конусности с учетом заданных радиальной и осевой нагрузок.

Ключевые слова: конический подшипник, проектный расчет, геометрические размеры.

Одной из особенностей проектирования опор роторов является тот факт, что главный геометрический параметр, а именно, диаметр входит в исходные данные и определяется при расчете валов. Если в качестве опор рассматриваются подшипники качения, то при известном диаметре опорной части вала в общем случае выбирается стандартный вариант с известной геометрией, а дальнейший расчет сводится к проверке по критерию долговечности или динамической грузоподъемности. Что касается подшипников скольжения, то на первом этапе определяется необходимая длина (для радиального подшипника) из условия обеспечения несущей способности по максимальному удельному давлению [1]:

$$L = F_r / ([p]d),$$

где F_r – радиальная нагрузка, $[p]$ – допустимое удельное давление материала вкладыша (втулки), d – диаметр опорной части вала.

Величина радиального зазора h_0 выбирается из рекомендуемого диапазона относительных зазоров $\psi = 2h_0/d = 0,001 \dots 0,003$ с учетом типа подшипника (гидростатический, гидродинамический или гидростатодинамический/гибридный), а также вида смазочного материала, класса точности и шероховатости рабочих поверхностей. Следует отметить, что большие значения относительного зазора ψ характерны для подшипников скольжения с гидростатическим принципом создания несущей способности. В гидродинамических подшипниках (особенно при использовании маловязких смазочных материалов, в частности, газов) высокоскоростных роторных машин принимаются минимальные значения ψ . Для конического подшипника значения зазора ψ варьируются в диапазоне от $\psi_1 = 2h_0/D$ до $\psi_2 = 2h_0/d$, это связано с тем, что при одинаковой конусности подшипника и цапфы вала диаметральный зазор является постоянной величиной по длине подшипника, в отличие от диаметра, который возрастает [2]. В этом случае, поскольку в исходных данных задается габаритный диаметр D , можно выбрать величину радиального зазора h_0 из соотношения $\psi_1 = 2h_0/D$.

До появления современных средств вычислительной техники и численных методов расчета проектирование подшипников жидкостного трения проводилось на основе условных расчетов по удельным давлениям и величинам $pv \leq [pv]$ (v – линейная скорость точек на поверхности вала), а также с использованием экспериментальных номограмм, связывающих значения относительного эксцентриситета, длины и параметра подшипника, называемого числом Зоммерфельда [1]: $So = \mu\omega/pv^2$, где μ – динамическая вязкость смазочного материала (Па·с), ω – угловая скорость (рад/с), p – удельная нагрузка на единицу несущей поверхности подшипника (Па).

Подобные графики построены, как правило, для гладких цилиндрических подшипников полного или частичного охвата. На основании данных зависимостей определяется величина относительного радиального эксцентриситета: $\bar{e} = e/h_0$ при заданных значениях скоростей, вязкости и зазора, затем определяется величина минимального зазора [2]:

$$h_{\min} = h_0(1 - \bar{e}_{\min}) \geq [h]. \quad (1)$$

Допустимая величина минимального зазора определяется как с учетом высоты микронеровностей поверхностей шейки вала Ra_1 и втулки подшипника Ra_2 , деформации Δ и перекоса вала γ , а также коэффициента запаса S :

$$[h] = (Ra_1 + Ra_2 + \Delta + \gamma)S. \quad (2)$$

Проектировочный расчет конических подшипников (рис. 1) имеет свои особенности, связанные с тем, что при заданном диаметре вала (например, D) необходимо определить два неизвестных параметра – длину подшипника L и второй диаметр d (или угол конусности α). Решение задачи связано с необходимостью учета соотношения радиальных F_r и осевых F_a внешних сил [2].

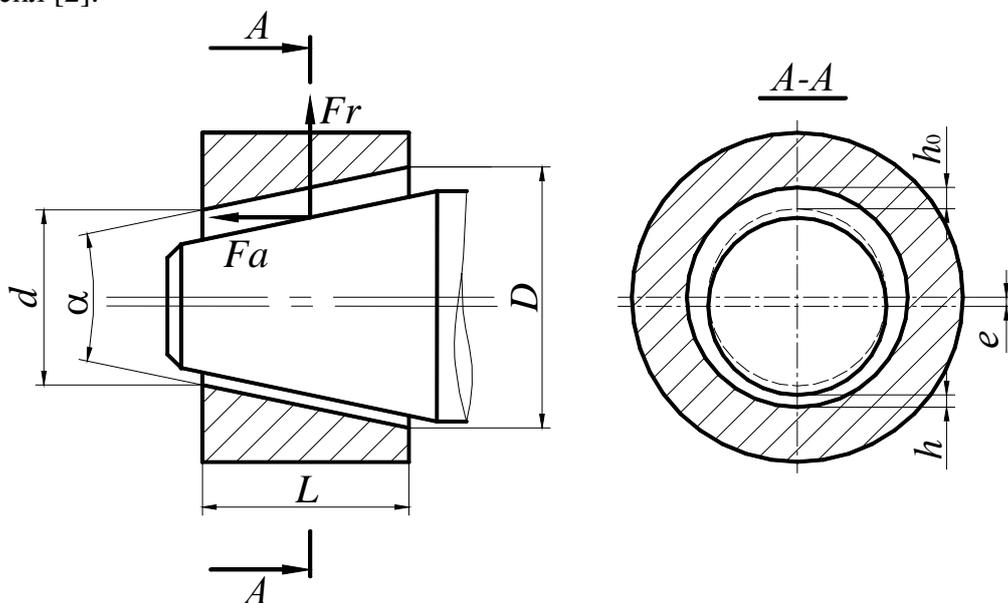


Рисунок 1 – Схема конического подшипника скольжения

Общий алгоритм проектировочного расчета подшипника скольжения сводится к определению размеров при заданных нагрузках с учетом свойств выбранных конструкционных и смазочных материалов. Применительно к коническим подшипникам данный алгоритм может быть записан следующим образом (рис. 2). Вначале задаются исходные данные: радиальная и осевая нагрузки и габаритный диаметр. Далее выбираются материалы, из которых будут изготовлены сопрягаемые детали (подшипник и вал) для обеспечения соответствующего коэффициента трения при смазке. В опорах скольжения встречаются три основных вида смазки, каждая из которых характеризуется соответствующим коэффициентом трения: жидкостная ($f = 0,001 \dots 0,005$), полужидкостная ($f = 0,01 \dots 0,03$) и граничная ($f = 0,1 \dots 0,2$). Наиболее предпочтителен режим жидкостной смазки, когда сопрягаемые поверхности гарантированно разделены слоем смазочного материала, что обеспечивает их безыносную работу [1, 2].

Следующие два блока посвящены выбору среднего радиального зазора исходя из габаритного диаметра D и относительного зазора ψ и расчету минимального зазора h_{\min} , который не должен быть меньше минимально допустимого значения $[h]$, определяемого по формуле (2). Далее рассчитывается коэффициент k_F исходя из соотношения осевой F_a и радиальной F_r нагрузок, необходимый для выбора значения угла конусности подшипника. Для чего записывается выражение для определения удельной нагрузки на конический подшипник в радиальном направлении:

$$p_r = \frac{F_r}{D_{cp}L} \leq [p],$$

или

$$p_r = \frac{2F_r}{(D+d)L} \leq [p], \quad (3)$$

где средний диаметр подшипника определяется как: $D_{cp} = (D+d)/2$.

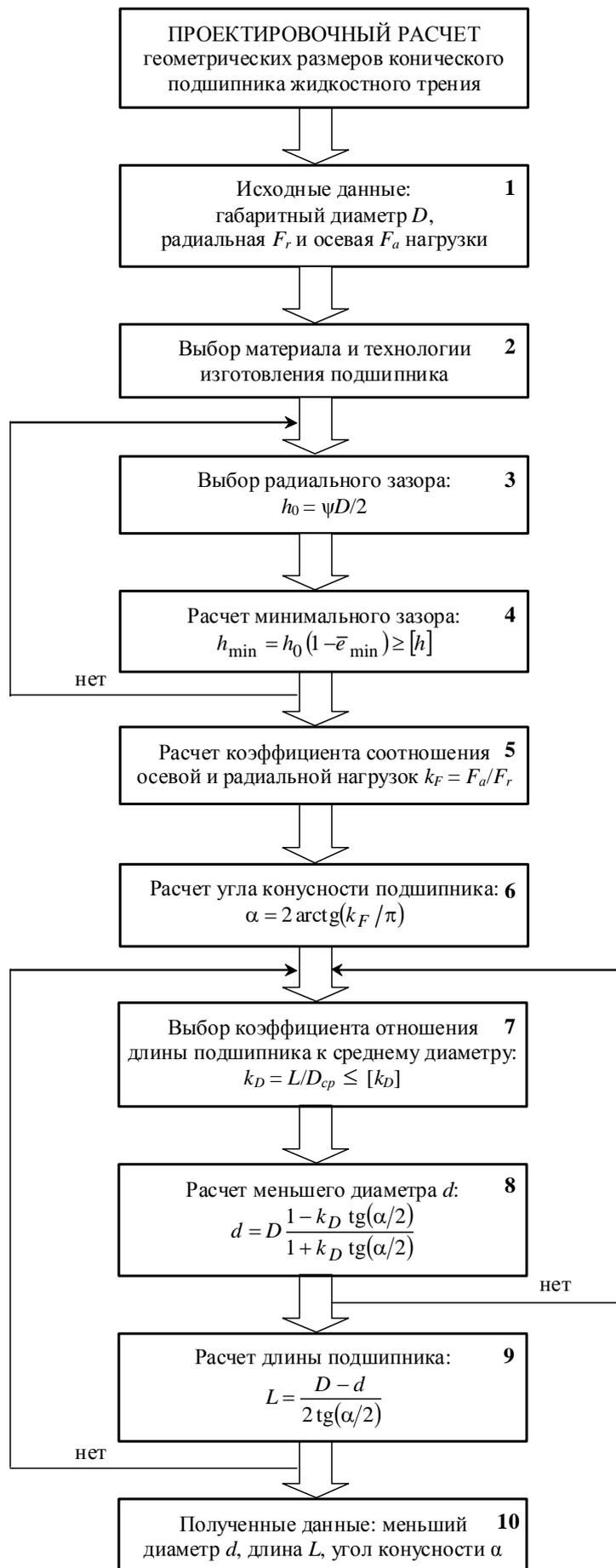


Рисунок 2 – Алгоритм проектировочного расчета конического подшипника

Удельная нагрузка на конический подшипник в осевом направлении может быть определена по выражению:

$$p_a = \frac{4F_a}{\pi(D^2 - d^2)} \leq [p]. \quad (4)$$

Тогда соотношение осевой F_a и радиальной F_r нагрузок, определяемое коэффициентом k_F , записывается через геометрические размеры конического подшипника скольжения:

$$k_F = \frac{F_a}{F_r} \leq \frac{\pi(D-d)}{2L}. \quad (5)$$

Учитывая, что $\text{tg}(\alpha/2) = (D-d)/2L$, где α – угол конусности, соотношение (5) записывается в виде: $k_F \leq \pi \text{tg}(\alpha/2)$. Откуда

$$\text{tg}(\alpha/2) \geq k_F / \pi.$$

Таким образом, угол конусности зависит от соотношения осевой и радиальной нагрузок и определяется как:

$$\alpha \geq 2 \arctg\left(\frac{k_F}{\pi}\right). \quad (6)$$

Принимая во внимание гипотезу равенства удельных нагрузок в радиальном и осевом направлениях для конического подшипника скольжения: $p_r = p_a$, можно рассчитать значение угла конусности: $\alpha = 2 \arctg(k_F / \pi)$. Расчет угла конусности конического подшипника скольжения от соотношения осевой и радиальной нагрузок приведен ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Значения угла конусности от коэффициента k_F

$k_F = Fa/Fr$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,75
α , рад	0	0,03	0,06	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,47
α , град	0	1,8	3,7	5,5	7,3	9,1	10,9	12,7	14,5	16,3	18,1	26,9

$k_F = Fa/Fr$	1	1,5	2	4	5	10	100	1000
α , рад	0,62	0,89	1,13	1,81	2,02	2,53	3,08	3,14
α , град	35,3	51,1	65,0	103,8	115,8	145,2	176,5	179,7

Ниже на рисунке 3 приведена диаграмма выбора угла конусности, рассчитанного по формуле (6), в зависимости от соотношения осевой и радиальной нагрузок. Отмечается, что при соотношении осевой и радиальной нагрузок в пределах $k_F = 2$ наблюдается линейная зависимость роста угла конусности. Дальнейшее увеличение коэффициента k_F приводит к более плавному росту угла конусности. В случае, если радиальная нагрузка составляет менее 1 % от осевой нагрузки, то угол конусности приближается к 180° , т.е. подшипник становится упорным.

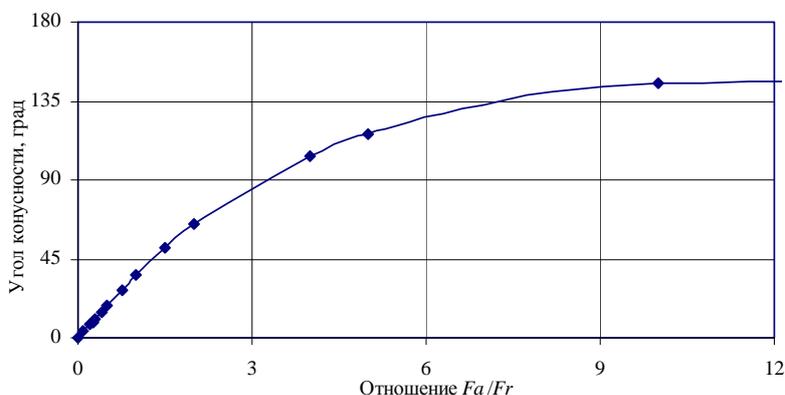


Рисунок 3 – Определение угла конусности в зависимости от соотношения F_a/F_r

Следующий шаг – выбор коэффициента отношения длины подшипника к его диаметру. В работе [1] отмечается, что радиальные подшипники с меньшими значениями L/D имеют пониженную несущую способность вследствие облегченного вытекания смазочного материала с торцов, однако такие подшипники менее чувствительны к перекосам. Кроме того, критическая толщина смазочного слоя у них значительно меньше, чем у подшипников с высоким отношением L/D . Это в значительной степени компенсирует пониженную несущую способность подшипников с малым L/D . Подшипники с большим отношением L/D , напротив, очень чувствительны к перекосам, вследствие чего критическая толщина смазочного слоя у них всегда больше. Исходя из вышперечисленного, и рекомендуется придерживаться для цилиндрических опор скольжения значений в диапазоне: $L/D = 0,8 \dots 1,2$. Для случая конической опоры по аналогии можно принять отношение длины подшипника к его среднему диаметру: $k_D = L/D_{cp}$, при этом должно выполняться следующее условие – коэффициент k_D не должен превышать допустимого значения этого коэффициента $[k_D]$: $k_D \leq [k_D]$. Расчет допустимого значения коэффициента отношения длины конического подшипника к среднему диаметру $[k_D]$ осуществляется из соотношения:

$$[k_D] = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha/2)}. \quad (7)$$

После выбора коэффициента k_D и выполнения условия: $k_D \leq [k_D]$, в заключительных блоках происходит непосредственно расчет меньшего диаметра d и длины L конического подшипника по формулам:

$$d = D \frac{1 - k_D \operatorname{tg}(\alpha/2)}{1 + k_D \operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (8)$$

$$L = \frac{D - d}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2)}. \quad (9)$$

В случае, если один из геометрических размеров подшипника не подходит по габариту, осуществляется выбор другого значения коэффициента отношения длины подшипника к среднему диаметру и производится перерасчет меньшего диаметра и длины до тех пор, пока эти значения не будут подходить по габаритам.

Предложенный алгоритм проектировочного расчета конического подшипника скольжения позволяет определить его геометрические размеры: меньший диаметр, длину и угол конусности, с точки зрения рационального проектирования, и может быть использован в дальнейших расчетах роторно-опорных узлов высокоскоростных турбомашин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов, П.И. Основы конструирования: Спр.-метод. пособие / Под ред. П.Н. Учаева. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.2. – 544 с.
2. Корнеев, А.Ю. Конические подшипники жидкостного трения: моногр. / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.

Корнеев Андрей Юрьевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-49
E-mail: korneev_andrey@mail.ru

Савин Леонид Алексеевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 43-29-43
E-mail: savin@ostu.ru

A.YU. KORNEYEV, L.A. SAVIN

THE DESIGN CALCULATION PROCEDURE OF THE LIQUID FRICTION CONICAL BEARINGS

The subject of design calculation of geometrics (diameters and cone angle) of the liquid friction conical bearings with preset radial and axial loads is considered.

Keywords: conical bearing, design calculation, geometrics.

BIBLIOGRAPHY

1. Orlov, P.I. Osnovy konstruirovaniya: Spr.-metod. posobie / Pod red. P.N. Uchaeva. – M.: Mashino-stroenie, 1988. – T.2. – 544 s.
2. Korneev, A.Ju. Konicheskie podshipniki zhidkostnogo treniya: monogr. / A.Ju. Korneev, L.A. Savin, O.V. Solomin. – M: Mashinostroenie-1, 2008. – 172 s.

Korneev Andrey Yurievich

State University ESPC

Candidate of technical sciences, associated professor, chair “Dynamics and machine strength”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-49

E-mail: korneev_andrey@mail.ru

Savin Leonid Alekseevich

FSBEI HPE «State University – SEPC»

Doctor Sc. Technical, Head of the Department “Mechatronics and International Engineering”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862 43-29-43

E-mail: savin@ostu.ru

С.И. МАТЮХИН, Г.Р. МАКУЛЕВСКИЙ, О.В. ДЕЕВ

ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАЗЕРНОГО ДИОДА НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Представлена математическая модель прямой ветви вольт-амперной характеристики лазерного диода на основе AlGaAs с разделным ограничением и квантоворазмерной активной областью. Изучены факторы, определяющие пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление таких диодов. Предложены пути повышения коэффициента полезного действия диодов, обусловленные понижением их тепловых потерь.

Ключевые слова: математическое моделирование; полупроводниковый лазер; арсенид галлия; двойная гетероструктура; разделное ограничение; вольт-амперная характеристика; коэффициент полезного действия.

1 ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных проблем лазерной техники является проблема повышения эффективности преобразования электрической энергии в энергию когерентного лазерного излучения. Для полупроводниковых лазеров указанная проблема особенно актуальна благодаря их широкому использованию в устройствах чтения и записи компакт-дисков (CD, DVD), телекоммуникации, в системах прецизионного измерения перемещений и спектроскопии высокого разрешения, для накачки твердотельных лазеров, а также в областях, связанных с обработкой материалов (резка, микросварка), и в медицине (лазерная хирургия, дерматология). Одним из возможных путей решения этой проблемы является понижение тепловых потерь лазерных диодов, обусловленное снижением их порогового напряжения U_T и дифференциального сопротивления r .

Как известно (рис. 1), параметры U_T и r задают положение прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых диодов:

$$U_F \approx U_T + rI_F \quad (1)$$

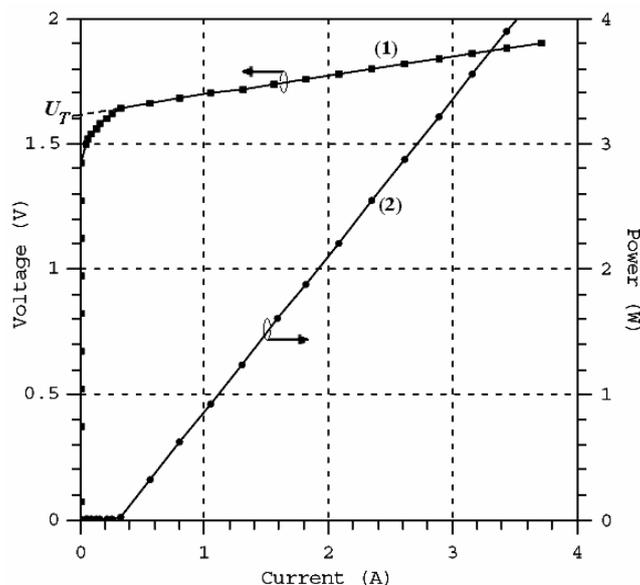


Рисунок 1 – Типичные вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики полупроводникового лазера на основе AlGaAs

и определяют полную мощность диодов P при заданном прямом токе I_F :

$$P \approx U_T I_F + rI_F^2. \quad (2)$$

В настоящей работе представлена математическая модель прямой ветви ВАХ лазерного диода на основе AlGaAs с отдельным ограничением и квантоворазмерной активной областью, и изучены факторы, определяющие пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление таких диодов.

2 СТРУКТУРА ЛАЗЕРНОГО ДИОДА С ОТДЕЛЬНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ

Типичная зонная диаграмма инжекционного лазера на основе двойной гетероструктуры с отдельным ограничением и квантоворазмерной активной областью представлена на рисунке 2. Основными элементами этой структуры являются: слаболегированная активная область I и область волновода II и сильно легированные эмиттерные слои III, ограниченные контактными p -слоем IV и n -подложкой V. Эмиттер p^+ -типа образует с n -базой электронно-дырочный гетеропереход (p^+-n), а эмиттер n^+ -типа – электронно-электронный переход (n^+-n). Кроме того, ещё два электронно-электронных гетероперехода образуются на границах активной области, и по одному изотипному гетеропереходу (дырочно-дырочный и электронно-электронный) возникает на границах p - и n -эмиттеров с контактными p -слоем и сильно легированной n -подложкой.

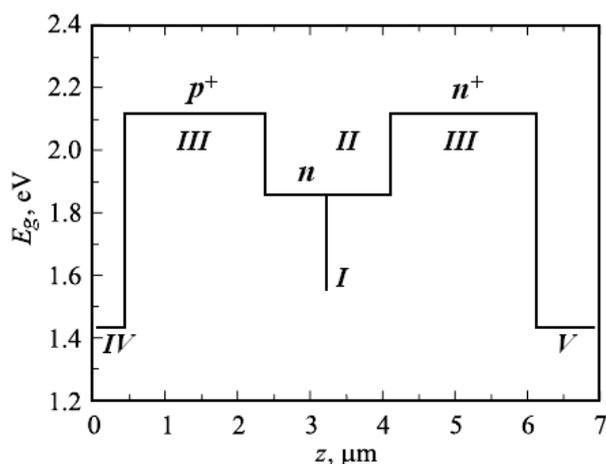


Рисунок 2 – Типичная зонная диаграмма инжекционного лазера на основе двойной гетероструктуры с отдельным ограничением

Толщина p^+-n -перехода l_0 равна [1–4]:

$$l_0 = l_{01} + l_{02}, \tag{3}$$

где l_{01} – протяженность p^+-n -перехода в сильнолегированную p^+ -область (рисунок 3):

$$l_{01} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2N_2(\varphi_C - U_j)}{eN_1(\varepsilon_1N_1 + \varepsilon_2N_2)}} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2N_2(\varphi_C - U_j)}{eN_1^2}}; \tag{4}$$

l_{02} – протяженность p^+-n -перехода в слаболегированную n -область ($l_{02} \gg l_{01}$):

$$l_{02} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2N_1(\varphi_C - U_j)}{eN_2(\varepsilon_1N_1 + \varepsilon_2N_2)}} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2(\varphi_C - U_j)}{eN_2}}; \tag{5}$$

e – заряд электрона; ε_0 – электрическая постоянная; ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости, соответственно, эмиттера и волновода; N_1 и N_2 – концентрации примесных атомов в эмиттере и в волноводе; U_j – напряжение на гетеропереходе, а φ_C – контактная разность потенциалов, обусловленная разностью уровней Ферми F_1 и F_2 в исходных полупроводниках (рисунок 3):

$$\varphi_C = (F_2 - F_1)/e = [(\chi_1 + E_{g1} - e\varphi_1) - (\chi_2 + e\varphi_2)]/e. \tag{6}$$

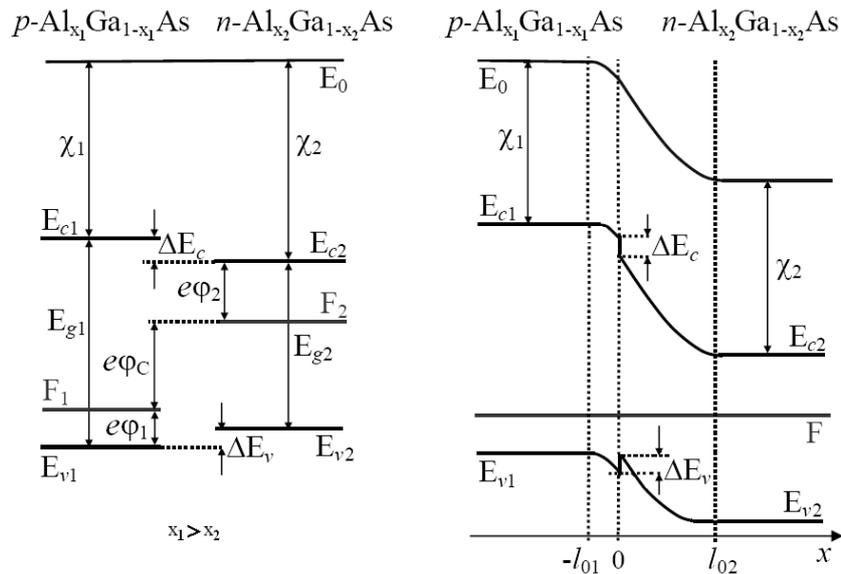


Рисунок 3 – Сшивка энергетических диаграмм на границе гетероструктуры

В выражении (6) χ_1 и χ_2 – это электронное сродство полупроводников, соответственно, в области эмиттера и в области волновода, E_{g1} – ширина запрещенной зоны полупроводника в области эмиттера, а $e\phi_1$ и $e\phi_2$ – расстояния до уровней Ферми, соответственно, от потолка валентной зоны E_{v1} в эмиттере и от дна зоны проводимости E_{c2} в волноводе:

$$\phi_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{v1}}{N_1}, \quad (7)$$

$$\phi_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{c2}}{N_2}. \quad (8)$$

Толщина n^+ - n -перехода на границе n -базы и n^+ -эмиттера будет определяться теми же формулами (3) – (5) с той разницей, что контактная разность потенциалов ϕ'_C на этой гетерогранице не будет зависеть от ширины запрещенной зоны эмиттера:

$$\phi'_C = (F_1 - F_2) / e = [(\chi_2 + e\phi_2) - (\chi_1 + e\phi'_1)] / e, \quad (9)$$

где $e\phi'_1$ – расстояние от дна зоны проводимости E_{c1} до уровня Ферми в эмиттере:

$$\phi'_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{c1}}{N_1}. \quad (10)$$

В формулах (7), (8) и (10) k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура полупроводников, а N_{c1} , N_{v1} и N_{c2} – эффективные плотности состояний для электронов в зоне проводимости эмиттера, для дырок в валентной зоне эмиттера и для электронов в зоне проводимости волновода соответственно. Для определения значений этих величин (в см^{-3}) в настоящей работе используются следующие полуэмпирические соотношения [4, 5]:

$$N_c(x) = \begin{cases} 4.82 \cdot 10^{15} T^{3/2} (0.063 + 0.083x)^{3/2}, & x < 0.45, \\ 4.82 \cdot 10^{15} T^{3/2} (0.85 - 0.14x)^{3/2}, & x \geq 0.45; \end{cases} \quad (11)$$

$$N_v(x) = 4.82 \cdot 10^{15} T^{3/2} (0.51 + 0.25x)^{3/2}, \quad (12)$$

где x – мольная концентрация алюминия в твёрдых растворах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, соответствующих той или иной области лазерной структуры (x_1 – в эмиттере: $N_{c1} \equiv N_c(x_1)$, $N_{v1} \equiv N_v(x_1)$, x_2 – в волноводе: $N_{c2} \equiv N_c(x_2)$).

Для определения диэлектрической проницаемости и электронного сродства $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в работе используются эмпирические выражения [5]:

$$\varepsilon(x) = 12.9 - 2.84x; \quad (13)$$

$$\chi(x) = \begin{cases} 4.07 - 1.1x, & x < 0.45, \\ 3.64 - 0.14x, & x \geq 0.45. \end{cases} \quad (14)$$

Ширина запрещенной зоны полупроводников рассчитывается по эмпирической формуле Варшни (в эВ):

$$E_g(x, T) = E_{g0}(x) + \frac{\alpha(x)T_0^2}{\beta(x) + T_0} - \frac{\alpha(x)T^2}{\beta(x) + T}, \quad (15)$$

в которой $T_0 = 300$ К, а функции $E_{g0}(x)$, $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ имеют вид [6, 7]:

$$E_{g0}(x) = \begin{cases} 1.424 + 1.247x, & x < 0.45, \\ 1.9 + 0.125x + 0.143x^2, & x \geq 0.45; \end{cases} \quad (16)$$

$$\alpha(x) = 5.405 \cdot 10^{-4} - 1.405 \cdot 10^{-4}x, \quad (17)$$

$$\beta(x) = 204(1 - x). \quad (18)$$

Толщины изотипных гетеропереходов, возникающих на границах активной области и на границах эмиттеров с контактным p -слоем и n -подложкой, могут быть рассчитаны по формулам, аналогичным (3) – (10). При этом заранее очевидно, что эти толщины, как и толщина n^+ - n -перехода на границе n -базы и n^+ -эмиттера, значительно меньше толщины p^+ - n -перехода l_0 , так как соответствующие контактные разности потенциалов φ'_C значительно меньше контактной разности потенциалов φ_C .

3 ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАЗЕРНОГО ДИОДА В ПРЯМОМ НАПРАВЛЕНИИ

Исходя из структуры лазерного диода, следует сделать вывод, что прямое падение напряжения на диоде равно:

$$U_F = \sum_j U_j + U_2 + \sum_l U_l, \quad (19)$$

где первое слагаемое в правой части отвечает сумме падений напряжения U_j на гетеропереходах, второе – падению напряжения U_2 на слаболегированной n -базе, а третье – суммарному падению напряжения на сильно легированных слоях полупроводниковой структуры, которое определяется их омическим сопротивлением r_l и током:

$$\sum_l U_l = \sum_l r_l I_F = \sum_l \rho_l \frac{d_l}{S_0} I_F. \quad (20)$$

В выражении (20) $S_0 \approx L_0 W_0$ – это активная площадь переходов, равная в случае плосковых контактов произведению длины лазерного резонатора L_0 на ширину полоска W_0 ; d_l – толщины соответствующих слоёв, а ρ_l – удельные сопротивления этих слоёв, определяемые подвижностью соответствующих носителей заряда μ_l и уровнем легирования слоёв N_l :

$$\rho_l \approx \frac{1}{e\mu_l N_l}. \quad (21)$$

В настоящей работе, следуя [8], мы считаем, что для твёрдых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, содержащих N примесных атомов в 1 см^3 , подвижности электронов и дырок определяются выражением [в $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$]:

$$\mu(x, N, T) = \gamma \left\{ \mu_{\min}(x) + \frac{\mu_{\max}(x) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\theta_1(x)} - \mu_{\min}(x)}{1 + \left(\frac{N}{N_0(x) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\theta_2(x)}} \right)^{\lambda(x)}} \right\}, \quad (22)$$

где в случае дырок:

$$\begin{aligned} \mu_{\min}(x) &= 20 - 67.14x + 57.14x^2, \\ \mu_{\max}(x) &= 491.5 - 1072.69x + 781.19x^2, \\ N_0(x) &= \exp(39.536 - 2.27574x + 3.229x^2), \\ \theta_1(x) &= \frac{2.2(1-x) + 2.24x}{1+x(1-x)}, \\ \theta_2(x) &= 3.0, \\ \lambda(x) &= 0.38 - 0.313x + 0.42x^2; \end{aligned} \quad (23)$$

а в случае электронов:

$$\begin{aligned} \mu_{\min}(x) &= \begin{cases} 500 \left(\frac{m_e(0)}{m_e(x)} \right)^{3/2} \frac{\varepsilon'(0)^{-1} - \varepsilon(0)^{-1}}{\varepsilon'(x)^{-1} - \varepsilon(x)^{-1}}, & x < 0.45, \\ 10, & x \geq 0.45; \end{cases} \\ \mu_{\max}(x) &= \begin{cases} 9400 \left(\frac{m_e(0)}{m_e(x)} \right)^{3/2} \frac{\varepsilon'(0)^{-1} - \varepsilon(0)^{-1}}{\varepsilon'(x)^{-1} - \varepsilon(x)^{-1}}, & x < 0.45, \\ 400, & x \geq 0.45; \end{cases} \\ N_0(x) &= (6 \times 10^{16})^{1-x} (5.46 \times 10^{17})^x, \\ \theta_1(x) &= \frac{2.1(1-x) + 2.1x}{1+x(1-x)}, \\ \theta_2(x) &= 3.0, \\ \lambda(x) &= 0.394 + 0.606x. \end{aligned} \quad (24)$$

В формулах (24) $\varepsilon'(x)$ – это высокочастотная диэлектрическая проницаемость полупроводника [9]:

$$\varepsilon'(x) = 10.89 - 2.73x, \quad (25)$$

а $m_e(x)$ – эффективная масса электронов. Для определения эффективных масс электронов и тяжелых дырок (в единицах массы покоя электрона) мы используем соотношения [5]:

$$m_e(x) = \begin{cases} 0.063 + 0.083x, & x < 0.45, \\ 0.85 - 0.14x, & x \geq 0.45; \end{cases} \quad (26)$$

$$m_h(x) = 0.51 + 0.25x. \quad (27)$$

Множитель γ в формуле (22) является подгоночным [8] и определяется из условия наилучшего согласия теоретических расчетов с экспериментом. В настоящей работе мы считаем его одинаковым для электронов и дырок и принимаем равным $\gamma \approx 1.6$.

Падение напряжения на n -базе при высоких уровнях инжекции равно [10 – 12]:

$$U_2 \approx \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + \rho_2 \frac{d_2}{S_0} I_F, \quad (28)$$

где d_2 – равная ширине волновода толщина n -базы, а $L_{p2} = \sqrt{D_{a2}\tau_{p2}}$ – амбиполярная диффузионная длина дырок в волноводе, которая выражается через амбиполярный коэффициент диффузии $D_{a2} = 2D_{p2}/(1 + \mu_{p2}/\mu_{n2})$. Величины μ_{n2} и μ_{p2} в этом последнем выражении – это подвижности электронов и дырок в волноводе [$\mu_{n2} \equiv \mu_n(x_2)$, $\mu_{p2} \equiv \mu_p(x_2)$], а D_{p2} и τ_{p2} – соответственно, коэффициент диффузии и среднее время жизни дырок в n -базе. Исходя из соотношения Эйнштейна, $D_{p2} = kT\mu_{p2}/e$. Среднее время жизни дырок в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ мы принимаем равным 1 нс ($\tau_{p2} \approx 1$ нс).

Первое слагаемое в выражении (28) учитывает тот факт, что сопротивлением квантоворазмерной активной области при высоких уровнях инжекции можно пренебречь, а удельная электропроводность волновода из-за роста концентрации электронов и дырок увеличивается с ростом тока пропорционально току. Вследствие этого падение напряжения на базе остается постоянным. Однако с ростом концентрации носителей в базе возрастает инжекция неосновных носителей в p^+ - и n^+ -эмиттеры, коэффициенты инжекции этих эмиттеров падают; кроме того, начинает проявляться взаимное рассеяние электронов и дырок, что приводит к уменьшению их подвижности. Вследствие этого проводимость базы, несмотря на рост концентрации электронов и дырок, остается примерно постоянной, а падение напряжения на базе возрастает пропорционально току.

Это обстоятельство учитывает второе слагаемое в выражении (28). Входящее в это слагаемое удельное сопротивление ρ_2 , обусловленное взаимным рассеянием носителей, является в нашей модели феноменологическим параметром и уменьшается с температурой как $T^{-1.5}$ вследствие роста определяемой рассеянием носителей подвижности μ_{np} [10 – 13]. Кроме того, эта подвижность зависит от концентрации $n \approx p$ инжектированных электронов и дырок в n -базе, а также от мольной концентрации x_2 алюминия в базе [13]:

$$\mu_{np}(x_2, T) \sim \frac{\varepsilon(x_2)^2}{n\sqrt{m_e(x_2)m_h(x_2)}/[m_e(x_2) + m_h(x_2)]} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5}. \quad (29)$$

Вследствие этого мы считаем, что удельное сопротивление ρ_2 базы определяется выражением:

$$\rho_2 = \frac{\rho_0}{\varepsilon_2^2} \sqrt{\frac{m_{e2}m_{h2}}{m_{e2} + m_{h2}}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5}, \quad (30)$$

где $\varepsilon_2 \equiv \varepsilon(x_2)$, $m_{e2} \equiv m_e(x_2)$, $m_{h2} \equiv m_h(x_2)$, а ρ_0 – некоторая постоянная.

Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными [14, 15] дает для ρ_0 величину $\rho_0 \approx 114$ Ом·см.

Сумму падений напряжения на гетеропереходах лазерной структуры согласно существующей теории гетеропереходов [16, 17] можно представить в виде:

$$\sum_j U_j \approx \frac{\eta kT}{e} \ln\left(\frac{I_F}{I_S} + 1\right), \quad (31)$$

где η – так называемый фактор идеальности, а I_S – обратный ток насыщения. Значения этих последних величин зависят от механизмов ограничения тока через лазерную структуру.

Если ток ограничивается процессами диффузии малоподвижных дырок, инжектированных из p^+ -эмиттера в слаболегированную n -базу, η и I_S определяются выражениями [10 – 12]:

$$\eta \approx 2, \quad (32)$$

$$I_S \approx \frac{eD_{p2}n_{i2}S_0}{L_{p2}} \text{cth}\left(\frac{d_2}{L_{p2}}\right), \quad (33)$$

в которых $L_{p2} = \sqrt{D_{p2}\tau_{p2}}$ – диффузионная длина дырок, а n_{i2} – концентрация собственных носителей заряда в n -базе [1 – 3]:

$$n_{i2} = \sqrt{N_c(x_2)N_v(x_2)} \exp\left(-\frac{E_g(x_2, T)}{2kT}\right). \quad (34)$$

Если ток через диод ограничивается процессами термоэлектронной эмиссии на p^+ - n -гетеропереходе [16, 17],

$$\eta \approx 1 + \frac{\varepsilon_2 N_2}{\varepsilon_1 N_1}, \quad (35)$$

$$I_S \approx A^* S_0 N_1 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \exp\left(-\frac{e\varphi_C}{kT}\right), \quad (36)$$

где A^* – постоянная, определяемая, в основном, проникаемостью барьера на гетерогранице.

Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными [14, 15] дает для A^* величину $A^* \approx 2.2 \cdot 10^{-16}$ А·см.

Аналогичные выражения для η и I_S с естественной заменой φ_C на φ'_C справедливы и в случае ограничения тока процессами термоэлектронной эмиссии на n^+ - n -гетеропереходе. При этом, однако, заранее очевидно, что при прочих равных условиях n^+ - n -гетеропереход, а также другие изотипные переходы вносят меньший вклад в (31) вследствие того, что $\varphi'_C \ll \varphi_C$.

Таким образом, в соответствии с формулами (19), (20), (28) и (31), а также с учетом (30) вольтамперная характеристика лазерного диода в прямом направлении имеет вид:

$$U_F \approx \frac{\eta kT}{e} \ln\left(\frac{I_F}{I_S}\right) + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + \frac{\rho_0}{\varepsilon_2^2} \sqrt{\frac{m_{e2}m_{h2}}{m_{e2} + m_{h2}}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{d_2}{S_0} I_F + \sum_l \rho_l \frac{d_l}{S_0} I_F, \quad (37)$$

где удельные сопротивления сильно легированных слоев ρ_l определяются выражениями (21) – (24), а значения η и I_S – формулами (32) и (33) или (35) и (36).

В случае резких гетеропереходов, образованных сильно различающимися по своим свойствам полупроводниками ($\varepsilon_2 N_2 \ll \varepsilon_1 N_1$, $\eta \approx 1$), основным механизмом ограничения тока через лазерную структуру является термоэлектронная эмиссия, и для η и I_S справедливы выражения (35) и (36). Если же гетеропереходы не являются резкими или свойства образующих их полупроводников близки ($\varepsilon_2 N_2 \approx \varepsilon_1 N_1$, $\eta \approx 2$), ток через лазерную структуру ограничивается процессами диффузии дырок в базе, а для η и I_S справедливыми оказываются формулы (32) и (33).

4 ПОРОГОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Степень согласия теоретических расчетов по формуле (37) [сплошные кривые] с результатами компьютерного моделирования лазерного диода [18 – 22] (маркеры) демонстрируют рисунки 4 – 11. Моделирование производилось в пакете программ Sentaurs TCAD компании Synopsys [23], а в качестве прототипа для моделирования был выбран мощный лазерный диод на основе двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs, излучающий на длине волны 808 нм [14, 15].

При теоретических расчетах мы полагали, что основным механизмом ограничения тока через диод является термоэлектронная эмиссия на p^+ - n -гетеропереходе, поэтому для вычисления значений η и I_S использовали формулы (35) и (36).

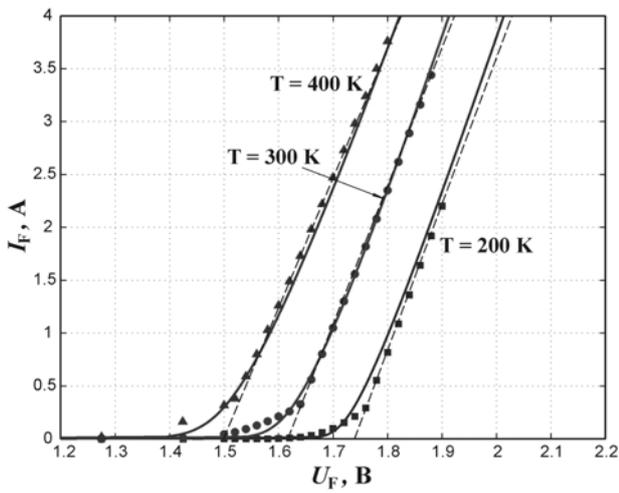


Рисунок 4 – ВАХ лазерного диода на основе AlGaAs, излучающего на длине волны 808 нм. Сплошные кривые – результаты теоретических расчетов по формуле (37); маркеры – результаты компьютерного моделирования в пакете Sentaurus TCAD фирмы Synopsys.

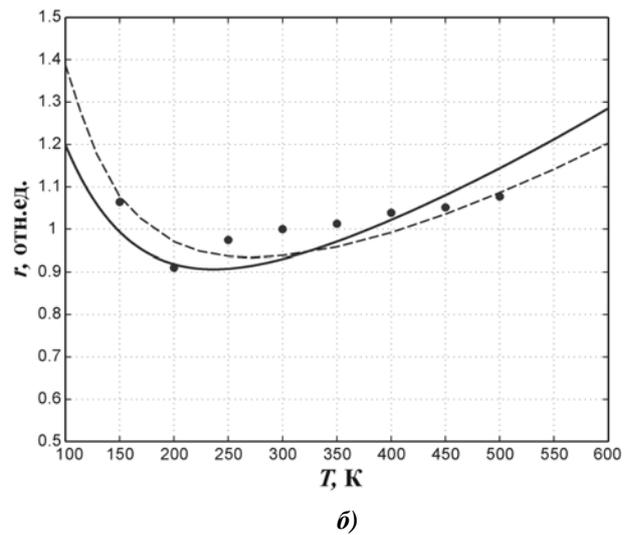
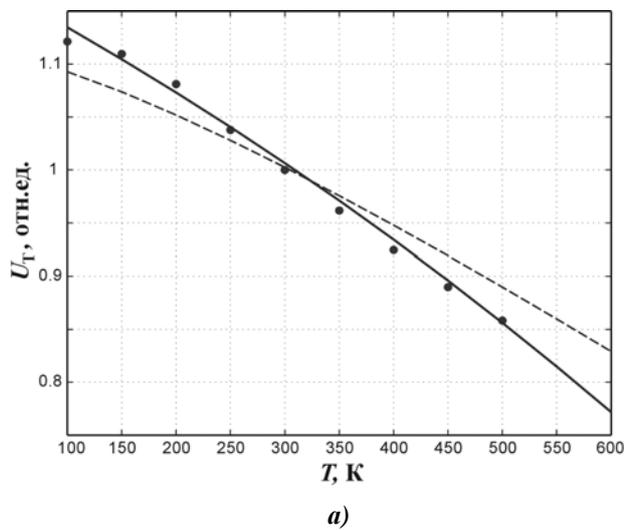


Рисунок 5 – Температурная зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs, излучающего на длине волны 808 нм.

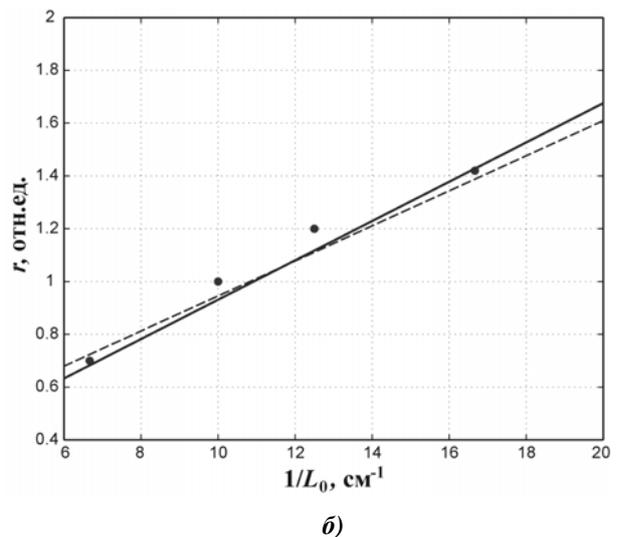
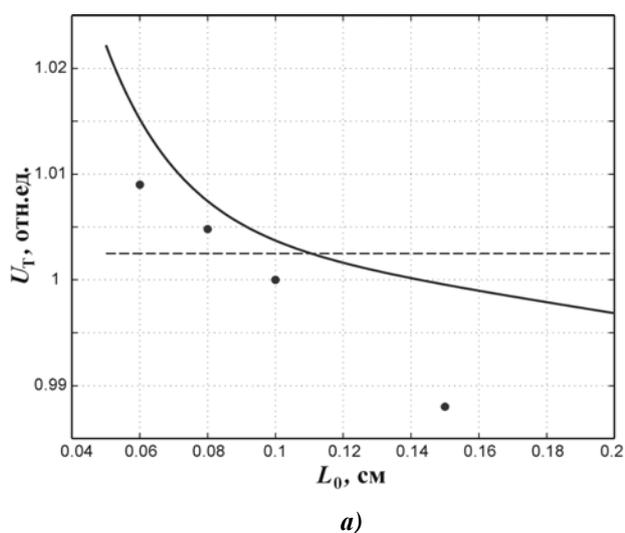


Рисунок 6 – Зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs, излучающего на длине волны 808 нм, от длины резонатора.

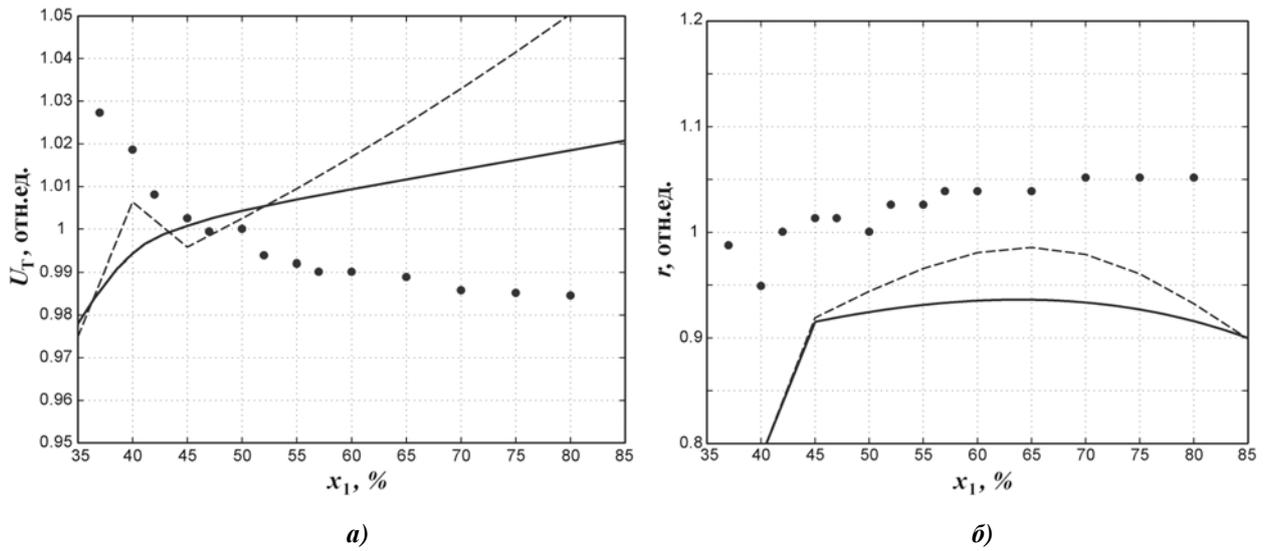


Рисунок 7 – Зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs от мольной концентрации алюминия в области эмиттеров.

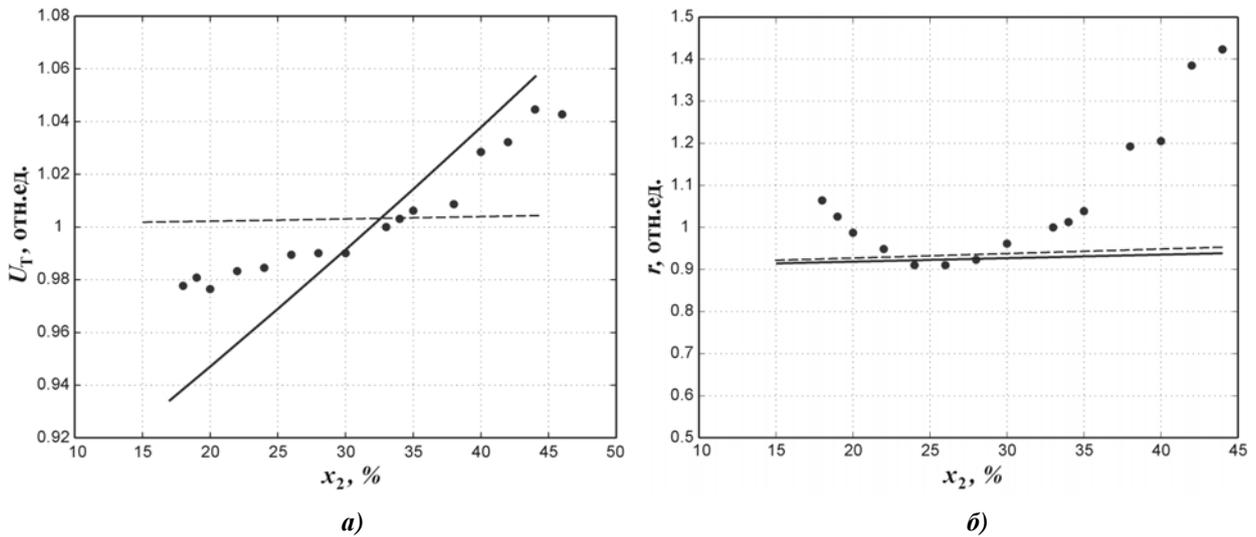


Рисунок 8 – Зависимость напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs от мольной концентрации алюминия в области волновода.

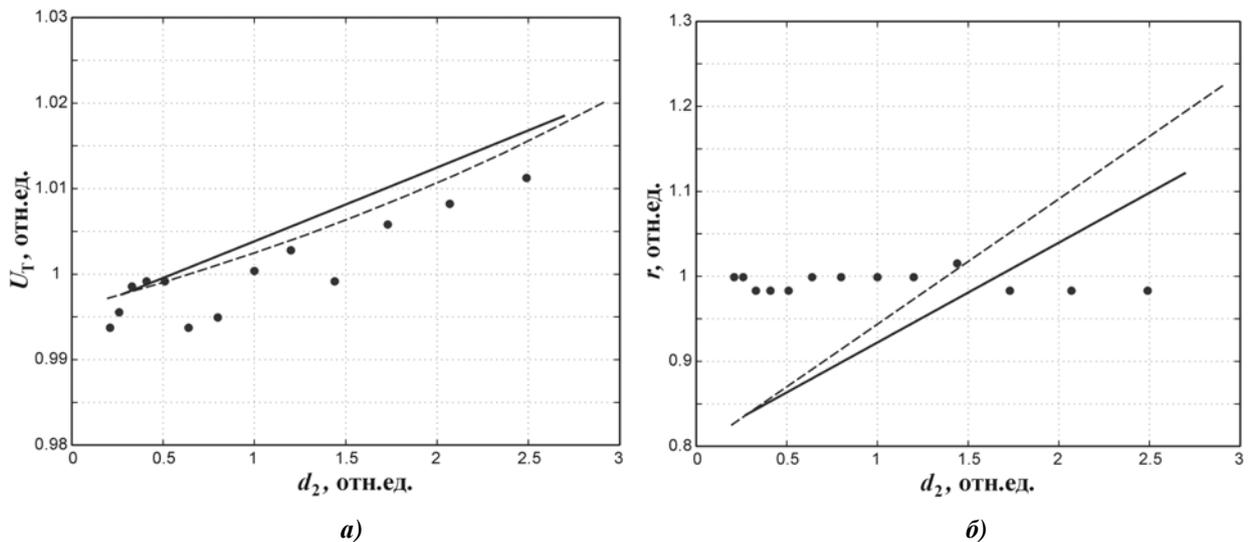


Рисунок 9 – Зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs, излучающего на длине волны 808 нм, от ширины волновода.

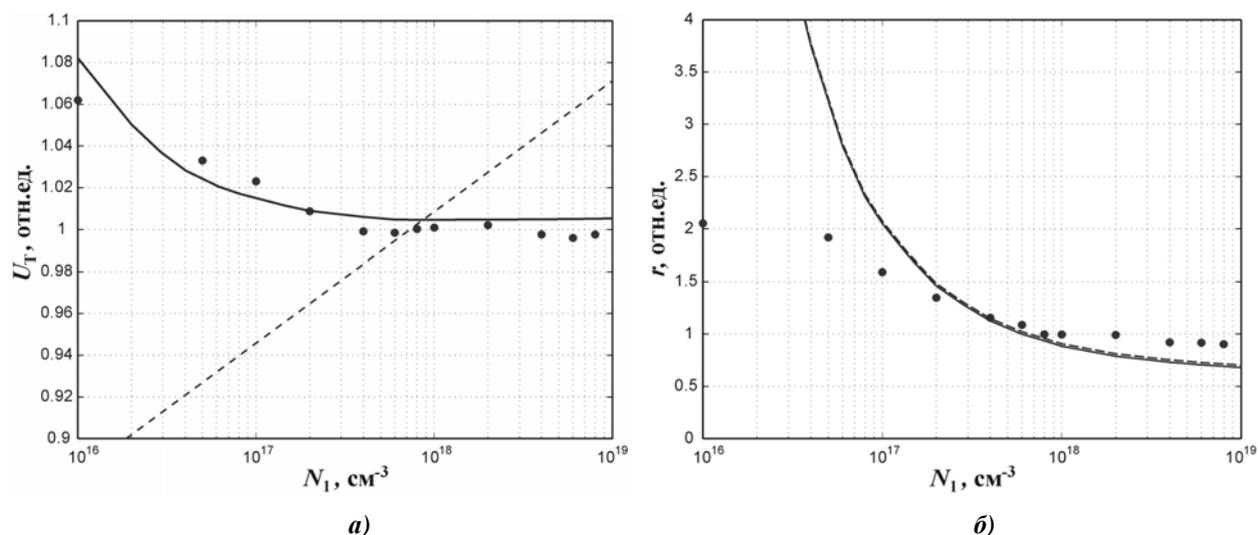


Рисунок 10 – Зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs от уровня легирования эмиттеров.

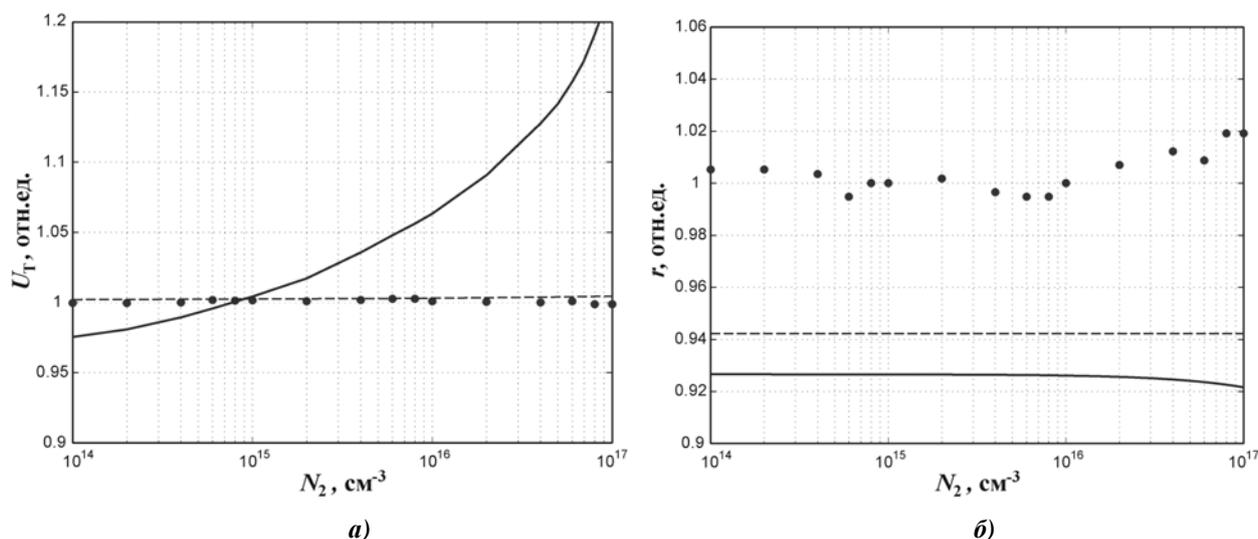


Рисунок 11 – Зависимость порогового напряжения (а) и дифференциального сопротивления (б) лазерного диода на основе AlGaAs от уровня легирования волновода.

Как видно из рисунков, представленная теория в целом находится в удовлетворительном согласии с результатами компьютерного моделирования. А те различия, которые наблюдаются в зависимостях порогового напряжения от мольной концентрации алюминия в эмиттерах (рис. 7, а) и уровня легирования волновода (рис. 11, а) можно объяснить переходом от эмиссионного к диффузионному механизму ограничения тока при $x_1 \rightarrow x_2$ и при $N_2 \rightarrow N_1$ соответственно.

По-видимому, тем же объясняются и незначительные различия между теорией и моделированием, которые наблюдаются в зависимостях $r(x_2)$ (рис. 8, б) и $r(N_1)$ (рис. 10, б) при $x_2 \rightarrow x_1$ и при $N_1 \rightarrow N_2$ соответственно. Кроме того, рисунок 9, б показывает, что при компьютерном моделировании в Sentaurus TCAD взаимное рассеяние электронов и дырок в базе не учитывалось.

Анализ формул (3) – (5) позволяет сделать вывод, что при напряжениях на переходах $U_j \rightarrow \varphi_C$ (или φ'_C) толщина области пространственного заряда $l_0 \rightarrow 0$, напряжения на переходах перестают меняться с током:

$$\sum_j U_j \approx \alpha(\varphi_C + \varphi'_C) = \alpha[E_{g1} - e(\varphi_1 + \varphi'_1)]/e, \quad (38)$$

и вольтамперная характеристика диода, как это следует из выражений (19), (20) и (28), становится линейной по току, приобретая вид:

$$U_F \approx \alpha \frac{E_{g1} - e(\varphi_1 + \varphi_1')}{e} + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + \frac{\rho_0}{\varepsilon_2^2} \sqrt{\frac{m_{e2}m_{h2}}{m_{e2} + m_{h2}}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{d_2}{S_0} I_F + \sum_l \rho_l \frac{d_l}{S_0} I_F, \quad (39)$$

где α – близкая к единице постоянная (в наших расчетах $\alpha \approx 0.85$).

Сравнивая (39) с (1), приходим к выводу, что пороговое напряжение лазерного диода U_T равно

$$U_T \approx \alpha \frac{E_{g1} - e(\varphi_1 + \varphi_1')}{e} + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right), \quad (40)$$

а его дифференциальное сопротивление r задается выражением:

$$r \approx \frac{\rho_0}{\varepsilon_2^2} \sqrt{\frac{m_{e2}m_{h2}}{m_{e2} + m_{h2}}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{d_2}{S_0} + \sum_l \rho_l \frac{d_l}{S_0}. \quad (41)$$

Результаты расчетов, произведенных по формулам (40) и (41), изображены на рисунках 5 – 11 пунктиром.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты позволяют выделить основные факторы, определяющие пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление лазерных диодов. В частности, как показывает выражение (40), пороговое напряжение полупроводниковых лазеров практически не зависит от уровня легирования базы и определяется, в основном, температурой, шириной запрещенной зоны и уровнем легирования эмиттеров, а также шириной базы и подвижностью и временем жизни носителей в базе. Таким образом, пороговое напряжение лазерных диодов на основе AlGaAs должно изменяться при изменении концентрации алюминия в эмиттерах и в волноводе (рис. 7 и 8, *a*), при изменении уровня легирования эмиттеров (рис. 10, *a*), а также при изменении температуры (рис. 5, *a*) и ширины волновода лазерных диодов (рис. 9, *a*). При этом, как показывают наши расчеты (рис. 7 – 10, *a*), если исключить температуру, изменения концентрации алюминия в волноводе и уровня легирования эмиттеров являются для порогового напряжения наиболее значимыми.

Дифференциальное сопротивление (41) лазерных диодов определяется длиной резонатора и шириной контактного полоска, температурой, удельным сопротивлением и толщиной сильнолегированных слоев лазерной структуры, а также диэлектрической проницаемостью, шириной базы и эффективными массами электронов и дырок в базе. Другими словами, дифференциальное сопротивление лазеров на основе AlGaAs должно изменяться при изменении их температуры (рис. 5, *b*) и геометрических размеров резонатора (рис. 6, *b*), при изменении толщины и уровня легирования подложки и эмиттерных слоев (рис. 10, *b*), а также при изменении ширины волновода (рис. 9, *b*) и концентрации алюминия в волноводе (рис. 7, *b*). При этом, исключая температуру, наибольшее значение для сопротивления имеют изменения геометрических размеров резонатора (рис. 6, *b*), толщины и уровня легирования подложки и эмиттерных слоев (рис. 10, *b*), а также ширины волновода (рис. 9, *b*).

Сделанные выводы позволяют предложить следующие пути повышения коэффициента полезного действия лазерных диодов, обусловленные понижением их тепловых потерь: 1) увеличение, насколько это позволяют условия использования лазерных диодов, длины резонатора и ширины контактного полоска; 2) уменьшение, насколько это возможно, мольной концентрации алюминия в области волновода, 3) не противоречащее условиям оптического ограничения уменьшение ширины волновода и 4) ограничиваемые технологическими пределами уменьшение толщины и увеличение уровня легирования подложки и эмиттеров. Причём, подложка *n*-типа является более предпочтительной, так как вклад в дифференциальное сопротивление слоев *p*-типа из-за низкой подвижности дырок оказывается выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртов, В.А. Твердотельная электроника / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2008. – С.58-65.
2. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов / А.И. Лебедев. – М.: Физматлит, 2008. – С.11-139.
3. Гаман, В.И. Физика полупроводниковых приборов / В.И. Гаман. – Томск: Изд-во Томского университета, 1989. – С. 102-116.
4. Кейси, Х. Лазеры на гетероструктурах. Т.1: Основные принципы / Х. Кейси, М. Паниш. – М.: Мир, 1981. – С. 218-293.
5. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties,- Electronic archive of the Ioffe Institute: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/index.html> (или <http://www.matprop.ru/AlGaAs>).
6. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band Parameters for III–V Compound Semiconductors and Their Alloys // J. Appl. Phys. 2001. V.89. No.11. P.5815-5875.
7. Electro-Optics Handbook / R.W. Waynant, M.N. Ediger, Ed's. - N.Y.: McGraw-Hill Inc., 2000. P.6.7.
8. Sotoodeh M., Khalid A.H., Rezazadeh A.A. Empirical low-field mobility model for III–V compounds applicable in device simulation codes // Journal of Applied Physics. 2000. V.87. N.6. P.2890-2900.
9. Samara G.A. Temperature and pressure dependence of the dielectric constants of semiconductors // Phys. Rev. B. 1983. V.27. P.3494-3505.
10. Евсеев, Ю.А. Силовые полупроводниковые приборы / Ю.А. Евсеев, П.Г. Дерменжи. – М.: Энергоиздат, 1981. – С.9-50.
11. Дерменжи, П.Г. Расчет силовых полупроводниковых приборов / П.Г. Дерменжи, В.А. Кузьмин, Н.Н. Крюкова, В.И. Мамонов, В.Я. Павлик. – М.: Энергия, 1980. – С.67-79.
12. Григоренко, В.П. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов / В.П. Григоренко, П.Г. Дерменжи, В.А. Кузьмин, Т.Т. Мнацаканов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 37-96.
13. Отблеск, А.Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике / А.Е. Отблеск, В.Е. Челноков. – Л.: Наука, 1984. – С.8-11.
14. Безотосный, В.В. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм на основе различных типов асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом / В.В. Безотосный, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.Н. Крохин, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Ю.М. Попов, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. // ФТП. 2008. Т.42. Вып.3. С.357-360.
15. Андреев, А.Ю. Мощные лазеры ($\lambda = 808$ нм) на основе гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs / А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашева, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, К.Ю. Телегин, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов // ФТП. 2009. Т.43. Вып.4. – С.543-547.
16. Милнс, А. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт. – М.: Мир, 1975. – 432 с.
17. Шарма, Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы / Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. – М.: Советское радио, 1979. – 232 с.
18. Матюхин, С.И. Длина волны полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs с квантоворазмерной активной областью / С.И. Матюхин, З.Ж. Козил, Г.Р. Магомедов, Д.О. Малый, С.Н. Ромашин // Ученые записки Орловского государственного университета. 2011. №3 (41). – С.74-83.
19. Матюхин, С.И. Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от концентрации алюминия в области волновода и эмиттеров / С.И. Матюхин, З.Ж. Козил, Г.Р. Магомедов, Д.О. Малый, С.Н. Ромашин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. №3 (287). – С. 26-35.
20. Матюхин, С.И. Компьютерное моделирование характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от положения активной области в волноводе / С.И. Матюхин, З.Ж. Козил, Г.Р. Магомедов, Д.О. Малый, С.Н. Ромашин // Информационные системы и технологии. 2011. №5 (67). – С.61-68.
21. Матюхин, С.И. Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от ширины квантоворазмерной активной области / С.И. Матюхин, З.Ж. Козил // Наноинженерия. 2012. №5. – С.14-17.
22. Матюхин, С.И. Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от ширины волновода / С.И. Матюхин, Г.Р. Макулевский, Д.О. Малый // Ученые записки Орловского государственного университета. 2012. В печати.
23. Sentaurus TCAD User Guide, - Synopsys, 2005 (<http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>).

Матюхин Сергей Иванович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Доктор физико-математических наук, декан Естественнонаучного факультета
Тел. (4862) 41-98-81
E-mail: sim1@mail.ru

Макулевский Гаджи Рашидович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Аспирант кафедры «Физика» Естественнонаучного факультета
Тел. (4862) 41-98-89
E-mail: maggadr@gmail.com

Деев Олег Викторович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Аспирант кафедры «Физика» Естественнонаучного факультета
Тел. (4862) 41-98-89
E-mail: olegdee@yandex.ru

S.I. MATYUKHIN, G.R. MAKULEVSKI, O.V. DEEV

I-V CURVE OF A LASER DIODE ON THE BASIS OF GALLIUM ARSENIDE

A mathematical model of the forward I-V characteristics of the AlGaAs laser diode with separate confinement and quantum-well active region is presented. The factors determining the threshold voltage and differential resistance of the diodes are investigated. The ways of increasing of the diode efficiency due to decreasing heat losses are proposed.

Keywords: *mathematical modeling, semiconductor laser, gallium arsenide, double heterostructure, separate confinement, I-V characteristics; efficiency.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gurtov, V.A. Tverdotel'naja jelektronika / V.A. Gurtov. – M.: Tehnosfera, 2008. – S.58-65.
2. Lebedev, A.I. Fizika poluprovodnikovyh priborov / A.I. Lebedev. – M.: Fizmatlit, 2008. – S.11-139.
3. Gaman, V.I. Fizika poluprovodnikovyh priborov / V.I. Gaman. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo univer-siteta, 1989. – S. 102-116.
4. Kejsi, H. Lazery na geterostrukturah. T.1: Osnovnye principy / H. Kejsi, M. Panish. – M.: Mir, 1981. – S. 218-293.
5. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties,- Electronic archive of the Ioffe Institute: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/index.html> (ili <http://www.matprop.ru/AlGaAs>).
6. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band Parameters for III–V Compound Semiconductors and Their Alloys // J. Appl. Phys. 2001. V.89. No.11. P.5815-5875.
7. Electro-Optics Handbook / R.W. Waynant, M.N. Ediger, Ed's. - N.Y.: McGraw-Hill Inc., 2000. P.6.7.
8. Sotoodeh M., Khalid A.H., Rezazadeh A.A. Empirical low-field mobility model for III–V compounds applicable in device simulation codes // Journal of Applied Physics. 2000. V.87. N.6. P.2890-2900.
9. Samara G.A. Temperature and pressure dependence of the dielectric constants of semiconductors // Phys. Rev. B. 1983. V.27. P.3494-3505.
10. Evseev, Ju.A. Silovye poluprovodnikovye pribory / Ju.A. Evseev, P.G. Dermenzhi. – M.: Jenergo-izdat, 1981. – S.9-50.
11. Dermenzhi, P.G. Raschet silovyh poluprovodnikovyh priborov / P.G. Dermenzhi, V.A. Kuz'min, N.N. Krjukova, V.I. Mamonov, V.Ja. Pavlik. – M.: Jenergija, 1980. – S.67-79.
12. Grigorenko, V.P. Modelirovanie i avtomatizacija proektirovanija silovyh poluprovodnikovyh priborov / V.P. Grigorenko, P.G. Dermenzhi, V.A. Kuz'min, T.T. Mnacakanov. – M.: Jenergoatomizdat, 1988. – S. 37-96.
13. Otblesk, A.E. Fizicheskie problemy v silovoj poluprovodnikovoj jelektronike / A.E. Otblesk, V.E. Chelnokov. – L.: Nauka, 1984. – S.8-11.
14. Bezotosnyj, V.V. Moshhnye lazernye diody s dlinoj volny izlucheniya 808 nm na osnove razlichnyh tipov asimmetrichnyh geterostruktur so sverhshirokim volnovodom / V.V. Bezotosnyj, V.V. Vasil'eva, D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, O.N. Krohin, A.Ju. Leshko, A.V. Ljuteckij, A.V. Murashova, T.A. Nalet, D.N. Ni-kolaev, N.A. Pihtin,

Ju.M. Popov, S.O. Slipchenko, A.L. Stankevich, Fetisova N.V., Shamahov V.V., Tarasov I.S. // FTP. 2008. T.42. Vyp.3. S.357-360.

15. Andreev, A.Ju. Moshhnye lazery ($\lambda = 808$ nm) na osnove geterostruktur razdel'nogo ogranichenija Al-GaAs/GaAs / A.Ju. Andreev, S.A. Zorina, A.Ju. Leshko, A.V. Ljuteckij, A.A. Marmaljuk, A.V. Murasheva, T.A. Nalet, A.A. Padalica, N.A. Pihtin, D.R. Sabitov, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, K.Ju. Telegin, V.V. Shamahov, I.S. Tarasov // FTP. 2009. T.43. Vyp.4. – S.543-547.

16. Milns, A. Geteroperehody i perehody metall-poluprovodnik / A. Milns, D. Fojht. – M.: Mir, 1975. – 432 s.

17. Sharma, B.L. Poluprovodnikovye geteroperehody / B.L. Sharma, R.K. Purohit. – M.: Sovetskoe ra-dio, 1979. – 232 s.

18. Matjuhin, S.I. Dlina volny poluprovodnikovogo DGS RO lazera na osnove AlGaAs s kvantovoraz-mernoj aktivnoj oblast'ju / S.I. Matjuhin, Z.Zh. Kozil, G.R. Magomedov, D.O. Malyj, S.N. Romashin // Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. №3 (41). – S.74-83.

19. Matjuhin, S.I. Zavisimost' harakteristik poluprovodnikovogo DGS RO lazera na osnove AlGaAs ot koncentracii aljuminija v oblasti volnovoda i jemitterov / S.I. Matjuhin, Z.Zh. Kozil, G.R. Magomedov, D.O. Malyj, S.N. Romashin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2011. №3 (287). – C. 26-35.

20. Matjuhin, S.I. Komp'juternoe modelirovanie harakteristik poluprovodnikovogo DGS RO lazera na osnove AlGaAs v zavisimosti ot polozenija aktivnoj oblasti v volnovode / S.I. Matjuhin, Z.Zh. Kozil, G.R. Magomedov, D.O. Malyj, S.N. Romashin // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2011. №5 (67). – S.61-68.

21. Matjuhin, S.I. Zavisimost' harakteristik poluprovodnikovogo DGS RO lazera na osnove AlGaAs ot shiriny kvantovorazmernoj aktivnoj oblasti / S.I. Matjuhin, Z.Zh. Kozil // Nanoinzhenerija. 2012. №5. – S.14-17.

22. Matjuhin, S.I. Zavisimost' harakteristik poluprovodnikovogo DGS RO lazera na osnove AlGaAs ot shiriny volnovoda / S.I. Matjuhin, G.R. Makulevskij, D.O. Malyj // Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. V pechati.

23. Sentaurus TCAD User Guide, - Synopsys, 2005 (<http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>).

Matyukhin Sergey Ivanovich

FGOU VPO «State University - UNPK», Orel

Doctor of physical and mathematical Sciences, Dean of the natural science faculty

Phone (4862) 41-98-81

E-mail: sim1@mail.ru

Makulevsky Haji Rashidovich

FGOU VPO «State University - UNPK», Orel

Graduate student of the chair of Physics natural Sciences Department

Phone (4862) 41-98-89

E-mail: maggadr@gmail.com

Deev Oleg Viktorovich

FGOU VPO «State University - UNPK», Orel

Graduate student of the chair of Physics natural Sciences Department

Phone (4862) 41-98-89

E-mail: olegdee@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ SCILAB

В статье рассмотрены возможности математического пакета scilab для выполнения термодинамических расчетов. Приведены примеры расчетов.

Ключевые слова: термодинамика, scilab, термодинамические расчеты.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач, рассматриваемых в данной статье актуально как при изучении курса химической термодинамики, так и при построении математических моделей различных процессов в металлургии и химической технологии. При массовом выполнении термодинамических расчетов необходимо использовать инструменты, позволяющие упростить или автоматизировать процесс. В качестве такого инструмента предлагается система компьютерной математики Scilab, дополненная модулем для термодинамических расчетов. Ее выбор обусловлен рядом преимуществ, которые рассмотрены в данной работе.

Целью данной статьи является рассмотрение возможностей применения Scilab для автоматизированного выполнения основных термодинамических расчетов:

1. Расчет термодинамических функций для химического вещества при заданных термодинамических переменных.
2. Расчет термодинамических функций для химической реакции при заданных термодинамических переменных и уравнениях химических реакций.
3. Определение системы линейно-независимых реакций.
4. Построение диаграмм Эллингема.
5. Расчет термодинамических функций химических реакций и простых веществ по закону Гесса на основании соответствующих термодинамических функций других реакций.
6. Анализ возможности протекания химических реакций в зависимости от значения термодинамических переменных и состава химической системы.
7. Расчет равновесных составов химических систем при заданном начальном составе системы и термодинамических переменных.

МАТРИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Большинство указанных выше термодинамических расчетов могут быть представлены как операции над матрицами.

Введем некоторые обозначения.

$Subst_{m \times 1}$ – Матрица формул индивидуальных веществ, входящих в систему.

$n_{m \times 1} = (n_1, n_2, \dots, n_m)^T$ – Состав химической системы, задаваемый в виде матрицы, элементами которой являются количества отдельных веществ.

$A_{r \times m}$ – Стехиометрическая матрица, задающая реакции, которые могут протекать в системе.

P – Давление в системе, Па.

T – Температура системы, К.

V – Объем системы, м³.

$\Delta_r U$ – Внутренняя энергия, Дж/моль.

$\Delta_r S$ – Энтропия, Дж/(мольК).

$\Delta_r H$ – Энтальпия, Дж/моль.

$\Delta_r G$ – Свободная энергия Гиббса, Дж/моль.

$\Delta_r F$ – Свободная энергия Гельмгольца, Дж/моль.

m – количество индивидуальных веществ в системе.

r – количество реакций в системе.

Набор химических реакций обобщенно может быть представлен в виде:

$$A \times Subst = 0 \quad (1)$$

или

$$\sum_j (Subst_j \alpha_{ij}) = 0 \quad \forall i = 1 \dots r \quad (2)$$

Заменяя символы химических веществ на энтальпии и энтропии образования химических веществ, получим формулу для расчета соответствующей термодинамической характеристики химической реакции. Тогда уравнения для расчета термодинамических функций для реакций в системе могут быть записаны при помощи произведений соответствующих матриц:

$$\Delta_r U_{r \times 1} = A_{r \times m} \times \Delta_f U_{m \times 1}^0 \quad (3)$$

$$\Delta_r H_{r \times 1} = A_{r \times m} \times \Delta_f H_{m \times 1}^0 \quad (4)$$

$$\Delta_r S_{r \times 1} = A_{r \times m} \times \Delta_f S_{m \times 1}^0 \quad (5)$$

$$\Delta_r G_{r \times 1} = \Delta_r H_{r \times 1} - T \cdot \Delta_r S_{r \times 1} \quad (6)$$

$$\Delta_r F_{r \times 1} = \Delta_r U_{r \times 1} - T \cdot \Delta_r S_{r \times 1} \quad (7)$$

Вычисления по формулам (3) – (7) в Scilab относятся к встроенным операциям и не требуют использования циклов. Вся совокупность вычисления термодинамических функций для реакций в системе можно оформить в виде одной функции **TERMOD(SUBST,A,T)**, вычисляющей матрицы значений $\Delta_r H_{r \times 1}$, $\Delta_r S_{r \times 1}^0$ по матрице стехиометрических коэффициентов $A_{r \times m}$, матрице формул веществ $Subst_{m \times 1}$, значению температуры T . Число строк матрицы $A_{r \times m}$ равно числу рассчитываемых реакций. Если $r = m = 1$, то расчет выполняется для одного индивидуального вещества.

ОСОБЕННОСТИ SCILAB

Представление основных термодинамических расчетов, как операций над матрицами позволяет более эффективно выполнять их с использованием математических программ Scilab и Matlab. Обе системы похожи, обладают примерно одинаковыми возможностями, но Matlab является платной, в то время как Scilab находится в свободном доступе. Преимуществом Matlab является наличие русскоязычной документации и большого количества литературы с примерами, в то время как для Scilab существует достаточно мало ресурсов на русском языке. Обе системы ориентированы на выполнение численных расчетов. Переменные в них рассматриваются как матрицы по умолчанию, соответственно все основные операции выполняются в соответствии с правилами линейной алгебры [1-3].

В Scilab можно также выполнить поэлементные операции над матрицей, для этого перед знаком соответствующей операции необходимо поставить точку. Данная особенность удобна для выполнения действий над элементами массива без использования циклов, как это делается во многих языках программирования. Scilab позволяет также работать с обычными числами, решать системы линейных и нелинейных уравнений и т. д.. Scilab имеет встроенные возможности построения двух-, трехмерных графиков, с возможностью экспорта в файл. Для выполнения примеров программ приведенных в статье использована версия Scilab 5.3 [1-3].

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ SCILAB

1. Ввод исходных данных.

Поскольку расчеты проводятся многократно для различных веществ полезно использовать функцию для определения коэффициентов полинома и стандартных значений по молекулярной формуле вещества. Функция **Data(SUBST)** позволяет получать термодинамические характеристики индивидуальных веществ из файла или базы данных по стехиометрической формуле вещества. В Scilab нет встроенных средств работы с базами данных, поиск информации о веществах при небольшом объеме исходных данных можно реализовать при по-

мощи оператора **select**. Так же возможно организовать считывание исходных данных из файла специального формата.

Для расчета над матрицами в функции необходимо учесть размерность переменной **Subst**. Для этого можно воспользоваться стандартной функцией **size()**, позволяющей определить количество строк и столбцов [1-3].

```
function [H1,S1]=Data1(Subst)
select Subst
case 'Subst1'
H=H1
S=S1 //Также можно считать данные из файла
case 'Subst2'
...
end;
endfunction
```

```
function [H,S]=Data(Subst)
[r,m]=size(Subst)
for i=1:r
for j=1:m
[H(i,j),S(i,j)]=Data1(Subst(i,j))
end
end
endfunction
```

Результатом работы такой функции будут матрицы значений энтальпии (**H**), энтропии (**S**), других данных, соответствующие матрице индивидуальных веществ **Subst**. Дальнейший расчет соответствующих функций для набора химических реакций выполняется путем умножения матрицы стехиометрических коэффициентов на матрицу соответствующих свойств, полученную для индивидуальных веществ, входящих в систему.

Для расчета свободной энергии Гиббса в качестве исходных данных [4-9] для полинома (8) используются: значения энтальпий образования веществ $\Delta H_{f,298}^0$ и коэффициентов $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \Delta d, I_1, I_2$.

$$\Delta G = \Delta H_{f,298}^0 - \Delta a \ln(T) - 0,5\Delta bT^2 - \frac{1}{6}\Delta cT^3 - 0,5\Delta d \frac{1}{T} + I_1T - I_2 \quad (8)$$

Формула (8) получена в результате интегрирования уравнения Гиббса-Гельмгольца с учетом температурной зависимости энтальпии образования.

Исходные данные для некоторых оксидов приведены в таблице 1. Указанные коэффициенты рассматривались для каждого оксида в различных температурных интервалах с учетом фазовых превращений.

Таблица 1 – Значения энтальпий образования оксидов $\Delta H_{f,298}^0$ и коэффициентов, $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \Delta d, I_1, I_2$ (пример исходных данных для расчета)

Вещество	Температурный интервал		$\Delta H_{f,298}^0$	Δa	Δb	Δc	Δd	I_1	I_2
	T ₁	T ₂							
BiO	298	544,2	209	0,8	1,3	0	3,8	100,5	0,936
BiO	544,2	1175	0	-8,4	12,1	0	3,8	58,2	-6,732
BiO	1175	1900	0	9,6	-0,4	0	3,8	175,4	-3,722
BiO	1900	1920	0	20,5	-0,4	0	3,8	360,5	-196,74
BiO	1920	2500	0	-0,8	-0,4	0	3,8	59,9	70,34

Поскольку объем исходных данных был небольшим (75 веществ, около 300 строк, включая различные температурные интервалы для каждого вещества) для хранения исходных данных была записана функция **Dat(Subst)**, результатом вызова которой по имени индивидуального вещества выдавалась матрица вида:

res=[T1,T2,DH298,Da,Db,Dc,Dd,I1,I2;...]

Каждая строка матрицы соответствует определенному температурному интервалу. В Scilab строки матрицы разделяются точкой с запятой. Каждая строка матрицы включала следующие элементы:

T1, T2 – Начало и конец температурного интервала, К;

DH298 – стандартная энтальпия образования вещества, Дж/моль;

Da, Db, Dc, Dd, I1, I2 – коэффициенты Δa , Δb , Δc , Δd , I_1 , I_2 .

Для выбора был использован оператор **select**. Для большего количества данных можно организовать считывание исходных данных из файла, т.е. переписать функцию **Dat(Subst)**. В любом случае результатом работы функции будет матрица вида **[T1,T2,DH298,Da,Db,Dc,Dd,I1,I2;...]**.

```
function [res]=Dat(Subst)
    select Subst
        case 'BiO'
            res=[298,544.2,209,0.8,1.3,0,3.8,100.5,0.936;544.2,1175,0,-8.4,12.1,0,3.8,58.2,-
                6.732;1175,1900,0,9.6,-0.4,0,3.8,175.4,-3.722;1900,1920,0,20.5,-0.4,0,3.8,360.5,-
                196.74;1920,2500,0,-0.8,-0.4,0,3.8,59.9,70.34];
            ...
        end;
    endfunction
```

Другая функция **DatSubst(Subst,rec)** была написана для выбора данных о конкретном температурном интервале.

rn – номер температурного интервала (по умолчанию **rn=1**).

rc – количество температурных интервалов.

Данная функция получала матрицу с данными о веществе и выбирала строки матрицы, соответствующие указанному температурному интервалу. Выполнялась так же корректировка исходных данных.

```
function [rn,rc,T1,T2,DH298,Da,Db,Dc,Dd,I1,I2]=DatSubst(Subst,rec)
    res1=Dat(Subst); [nr,nc]=size(res1);
    if(nr>=rec) then
        res=res1(rec,:);
    else
        res=res1(nr,:);
    end;
    rc=nr; rn=rec; T1=res(1); T2=res(2); DH298=res(3); Da=res(4); Db=res(5); Dc=res(6)
    Dd=res(7);
    I1=res(8); I2=res(9);
    DH298=-DH298*1000;    Db=Db*0.001;    Dc=Dc*0.000001;    Dd=Dd*100000;    I2=-
    I2*1000;
    endfunction
```

2. Расчет термодинамических функций $\Delta_r U$, $\Delta_r S$, $\Delta_r H$, $\Delta_r G$, $\Delta_r F$.

Для химических веществ существуют справочные данные [4-9] по стандартным значениям термодинамических функций. Кроме того для вычисления поправки для более высоких температур приводятся полиномы для расчета теплоемкости и коэффициенты к ним для расчетов по закону Кирхгофа. Для расчета по указанным формулам в Scilab должна быть за-

дана формула, учитывающая вид полинома, вещество и температуру. В ряде случаев в справочниках [5-8] приводятся готовые коэффициенты полиномов для расчета различных термодинамических функций, что исключает вычисление интегралов. Особенности Scilab позволяют получить значение соответствующей функции на всем температурном интервале, если ее аргумент будет также представлен как интервал значений температуры. Это удобно при построении графиков зависимости, требующих указания массивов координат точек для построения графика.

Значения функций $\Delta_r U$, $\Delta_r S$, $\Delta_r H$, $\Delta_r G$, $\Delta_r F$, полученных для отдельных веществ могут быть использованы для вычисления их аналогов для реакций в соответствии с формулами (3) - (7). При этом необходимо анализировать точки фазовых переходов для различных веществ, участвующих в реакции. В результате вычисление для одного температурного интервала разбивается на несколько отдельных задач. В некоторых справочниках приводятся значения коэффициентов полиномов для вычисления значений термодинамических функций распространенных реакций, учитывающие фазовые переходы участников реакции, что упрощает задачу.

Функции в Scilab могут возвращать несколько значений, таким образом, при помощи одной функции можно находить весь набор термодинамических характеристик реакции: энтальпии, энтропии, энергии Гиббса, с учетом поправок на температуру. В приводимом примере вычисление поправок термодинамических характеристик на температуру не показано, но достаточно легко реализуется при расчете матриц **H** и **S**.

```
function [DH,DS,DG]=TERMOD(SUBST,A,T)
[H,S]=Data(SUBST); DH=H*A; DS=S*A; DG=H-T*DS;
endfunction
```

Результатом работы функции будет набор матриц значений основных термодинамических функций на произвольном температурном интервале. Таким образом для выполнения простых термодинамических расчетов необходимы несколько функций:

Data(SUBST) Определяет термодинамические характеристики веществ, заданных матрицей **SUBST**.

Data1(SUBST) Вспомогательная функция, определяющая термодинамические данные для одного вещества.

TERMOD(SUBST,A,T) Функция для расчета термодинамических характеристик реакции: энтропии, энтальпии, энергии Гиббса.

3. Определение линейно-независимой системы уравнений.

Ряд термодинамических расчетов, например расчет равновесных составов выполняется с использованием системы линейно-независимых уравнений химических реакций. Число линейно-независимых уравнений равно рангу матрицы стехиометрических коэффициентов.

Для определения ранга матрицы в Scilab используется команда **rank(A)** [2-5]. Соответственно нет необходимости проводить вычисления для всей стехиометрической матрицы, а достаточно ограничиться матрицей вида $B_{rang(A) \times m}$. В Scilab подобное преобразование выполняется командой:

$$\mathbf{B}=\mathbf{A}(1:\mathbf{rank}(\mathbf{A}),:)$$

Двоеточие означает операцию среза матрицы.

Можно также воспользоваться командой **rref(A)** [2-5], приводящей матрицу **A** к треугольному виду по методу Гаусса и удалить из полученной матрицы строки, состоящие из нулей. Полученная матрица $B_{rang(A) \times m}$ описывает только уравнения линейно-независимых реакций. Остальные уравнения можно получить путем линейной комбинации вектор-строк матрицы $B_{rang(A) \times m}$. Практическое приложение данная задача находит при расчете термодинамических функций реакции при помощи закона Гесса.

Пусть имеется система линейно-независимых реакций с известными термодинамическими функциями $\Delta_r H_{k \times 1}$, заданная при помощи стехиометрической матрицы $B_{k \times m}$. При этом $k = \text{rang}(A)$. Необходимо вычислить соответствующую термодинамическую функцию для реакции, заданной вектор-строкой $C_{1 \times k} = x_{1 \times k} \times B_{k \times m}$. Математически данная задача сводится к решению системы линейных уравнений:

$$x_{1 \times k} \times B_{k \times k} = C_{1 \times k} \quad (9)$$

Решение может быть легко найдено: $x_{1 \times k} = C_{1 \times k} \times B_{k \times k}^{-1}$. Достаточно ограничиться k столбцами матрицы B . В Scilab решение уравнения может быть получено командой:

$$\mathbf{x}=\mathbf{B} \backslash \mathbf{C}.$$

Соответственно решение задачи, искомое значение термодинамической функции для линейно-зависимой реакции, определяемой стехиометрической матрицей $C_{1 \times k}$ может быть получено при помощи уравнения:

$$\Delta_r H_{k \times 1}^{(1)} = x_{1 \times k} \times \Delta_r H_{k \times 1} \quad (10)$$

4. Построение графиков средствами языка Scilab.

Для построения графиков в Scilab имеется функция **plot()**. ее параметрами являются два набора векторов. Вектор значений переменной и вектор значений функции. Для построения вектора значений переменной ее необходимо задать таким образом:

$$\mathbf{T}=300 : 10 : 1000$$

Запись означает присвоение T массива значений: 300, 310, 320, ..., 1000. А для получения вектора значений функции необходимо вычислить любую функцию от соответствующим образом заданной переменной.

Построение графика зависимости энергии Гиббса образования оксида от температуры выполняется командой: **plot2d(T1,DZ)**

Для манипуляции с элементами построенного графика (цвет, оси, сетка и т.д.) можно воспользоваться следующими командами:

```
//Изменение стилей графиков
j=1; a=gca();//Получить текущие оси
while(j<=countSubst)
  ch1=a.children(j); cf=ch1.children();//Свойства кривых по порядку
  cf.line_style=j; j=j+1;//Изменение стиля линии
end
//Оформление
titleX='T, К'; //Подписи по оси X
titleY='DZ, кДж/моль'; //Подписи по оси Y
legend(Subst,1); //Легенда располагается в верхнем правом углу
xtitle(name,titleX,titleY); xgrid(000);
x=getdate(); fname="ris.jpg"; xs2jpg(0,fname); //экспорт в графический файл формата
"* .JPEG"
```

Функция **gca()** возвращает дескриптор текущих осей для текущего рисунка [3]. С ним можно выполнять различные операции по форматированию графика. Более подробно с данной функцией можно ознакомиться в документации к программе. По умолчанию файл рисунка будет создан в рабочей директории Scilab.

5. Построение диаграмм Эллингема в широком температурном интервале.

Диаграмма Эллингема представляет собой график зависимости изменения свободной энергии Гиббса процесса от температуры для различных реакций [10]. Наибольшее применение они находят при анализе металлургических процессов при определении условий, в которых металлическая руда (обычно оксид, сульфид металла) будет восстанавливаться до ме-

талла. Линии в диаграммах Эллингема для оксидов металлов представляют собой прямые линии с положительным углом наклона. Чем ниже положение линии металла на диаграмме, тем более стабильным является его оксид. Стабильность оксидов металлов уменьшается с увеличением температуры. Нестабильные оксиды подвергаются термическому разложению. Кроме справочников существует ряд интернет ресурсов, позволяющих в интерактивном режиме получить соответствующие линии для различных соединений [11].

Для построения диаграмм Эллингема разработана программа на языке программирования, встроенном в Scilab, выбирающая данные из файла подготовленного в специальном формате, выполняющая расчет и выводящая один или несколько графиков в графический файл, одного из распространенных форматов. Программа предусматривает возможность работы как в диалоговом, так и в пакетном режиме.

Основные возможности программы: выборка данных для заданного оксида, разбиение заданного температурного интервала в соответствии со справочными данными для фазовых превращений соответствующих оксидов, построение непрерывного графика энергии Гиббса образования для оксида или группы оксидов, экспорт построенных графиков в файл графического формата (JPEG).

Для выполнения расчета предполагался следующий алгоритм.

- Ввод или выборка из базы данных значений $\Delta H_{f,298}^0$, Δa , Δb , Δc , Δd , I_1 , I_2 .
- Разбиение заданного температурного интервала на участки, для которых заданы значения коэффициентов соответствующего оксида.
- В каждом температурном интервале выполняется расчет матрицы значений ΔG с шагом 10 К.
- По матрицам значений ΔG и T для всего заданного температурного интервала средствами Scilab строится график. При необходимости в одних координатах строятся графики для нескольких оксидов.
- Построенный график экспортируется в файл графического формата (JPEG).

Функция **DZ_int(Subst,T_int)** вычисляла значение энергии Гиббса для указанного температурного интервала **T_int**. В качестве исходных данных она принимала название вещества и номер температурного интервала. результатом ее работы были две матрицы:

T – матрица значений температуры (по умолчанию шаг равен 10);

DZ – матрица значений энергии Гиббса образования оксида.

Кроме того показывалось общее количество температурных интервалов, **int_count**. Деление элементов матрицы **DZ** на 1000 выполнялось с целью вывода значений энергии Гиббса в кДж/моль.

```
function [T,DZ,int_count]=DZ_int(Subst,T_int)
    [rn,rc,T1,T2,DH298,Da,Db,Dc,Dd,I1,I2]=DatSubst(Subst,T_int);          int_count=rc;
    T=T1:10:T2;
    DZ=DH298-Da.*T.*log(T)-(1/2).*Db.*T.^2-(1/6).*Dc.*T.^3-(1/2).*Dd.*T.^(-1)+I1.*T-I2;
    DZ=DZ./1000;
endfunction
```

Затем следует функция **plotSubstInt(Subst,T_int)**, выполняющая непосредственно построение графика энергии Гиббса образования для вещества (**Subst**) в температурном интервале **T_int** средствами самой программы Scilab. Для вывода графика используется встроенная функция **plot2d(T1,DZ1)**, аргументами которой являются массиву горизонтальных и вертикальных координат точек графика.

```
function plotSubstInt(Subst,T_int)
    [T,DZ,int_count]=DZ_int(Subst,T_int); plot2d(T,DZ);
    titleX='T, K'; titleY='DZ, кДж/моль'; name='Диаграмма '+Subst; xtitle(name,titleX,titleY); xgrid(000);
endfunction
```

Аналогичная функция **plotSubst(Subst)**, выполняющая построение графика для вещества (**Subst**) во всех температурных интервалах.

```
function plotSubst(Subst)
    i=1; int_count=1; T1=[]; DZ1=[]; DZD1=[]; DZD2=[]; DZD=0; DZD=[];
    while(i<=int_count)
        [T,DZ,int_count]=DZ_int(Subst,i);    DZ_count=size(DZ,'*');    DZD1(i)=DZ(1);
        DZD2(i)=DZ(DZ_count);
        if(i>1) then
            DZD=DZD+DZD1(i)-DZD2(i-1); DZ=DZ-DZD;
        end;
        T1=[T1,T]; DZ1=[DZ1,DZ]; i=i+1; //Объединение матриц
    end;
    plot2d(T1,DZ1);
    //Оформление
    titleX='T, К';    titleY='DZ, кДж/моль';    name='Диаграмма '+Subst;    xti-
    tle(name,titleX,titleY);    xgrid(000);
endfunction
```

Аналогичная функция **plotPolySubst(Subst)**, выполняющая построение графиков для нескольких веществ в одних координатах. аргументом этой функции является матрица (**Subst**) с названиями веществ.

```
function plotPolySubst(Subst)
    countSubst=size(Subst,"*"); j=1; name='Диаграммы '; name1='_';
    while(j<=countSubst) //Расчет одного графика
        i=1; int_count=1; T1=[]; DZ1=[]; DZD1=[]; DZD2=[]; DZD=0; DZD=[]; c1=j; //Цвет
        кривой
        while(i<=int_count) //Перебор температурных интервалов
            [T,DZ,int_count]=DZ_int(Subst(j),i);    DZ_count=size(DZ,'*');    DZD1(i)=DZ(1);
        //Расчет
            DZD2(i)=DZ(DZ_count);
            if(i>1) then
                DZD=DZD+DZD1(i)-DZD2(i-1); DZ=DZ-DZD;
            end;
            T1=[T1,T]; DZ1=[DZ1,DZ]; i=i+1;
        end;
        plot2d(T1,DZ1);
        mtlb_hold('on');    name=name+Subst(j)+' ';    name1=name1+Subst(j)+'_';
        j=j+1; //Параметры вывода
    end;
    j=1; //Изменение стилей графиков
    a=gca(); //Получить текущие оси
    while(j<=countSubst)
        ch1=a.children(j); cf=ch1.children; //Свойства кривых по порядку
        cf.line_style=j; j=j+1; //Изменение стиля линии
    end
    titleX='T, К'; titleY='DZ, кДж/моль'; legend(Subst,1); //Оформление
    xtitle(name,titleX,titleY);    xgrid(000);    x=getdate();
    fname="ris"+name1+string(x(9))+string(x(10))+".jpg";    xs2jpg(0,fname); //экспорт в
    графический файл
endfunction
```

Для выполнения всех расчетов вещества, для которых выполнялся расчет были объединены в списки, например ['H2O','K2O','K2O2','Na2O'] и т.д. Такие списки служили исход-

У.Д. Верятин, В.П. Маширев, Н.Г. Рябцев и др. – М. : Атомиздат, 1971. – 461 с.

9. Термические константы веществ : Справочник в 10-ти вып. [Текст]: справ. изд. / В. А. Медведев и др.; Под ред. В. П. Глушко (отв. ред.). – М: Б.и., 1981. – 299 с.

10. Тамм М.Е., Третьяков Ю.Д. Неорганическая химия: В 3-х т. Т. 1: Физико-химические основы неорганической химии: Учебник для студ. высш. учеб. заведений Под ред. Ю.Д.Третьякова Издательский центр "Академия", 2004. - 240 с. ISBN 5-7695-1446-9

11. http://www.engr.sjsu.edu/ellingham/ellingham_tool_p1.php Интерактивный расчет диаграмм Эллингема.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы № 14.740.11.0271

Цымай Дмитрий Валериевич

ФГБОУ ВПО "Госунiversитет-УНПК", г. Орел

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: dmitryzy@gmail.com

Фроленков Константин Юрьевич

ФГБОУ ВПО "Госунiversитет-УНПК", г. Орел

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: chemistry@ostu.ru

D.V. TSYMAY, K.Yu. FROLENKOV

THERMODYNAMIC CALCULATIONS AUTOMATION WITH PACKAGE OF APPLIED MATHEMATICS PROGRAM SCILAB

The possibilities of mathematical package scilab for thermodynamic calculations. Examples of calculations.

Keywords: Thermodynamics, scilab, thermodynamic calculations.

BIBLIOGRAPHY

1. Alekseev E.R. Scilab. Reshenie inzhenernyh i matematicheskikh zadach / E.R. Alekseev, O.V. Chesnokova, E.A. Rudchenko : BINOM. 2008, 269s

2. Pavlova M.I. Rukovodstvo po rabote s paketom SCILAB, 2004, 209 str.

3. Chislennye i tehicheskie raschety v srede Scilab (PO dlja reshenija zadach chislennyh i tehicheskikh vychislenij). Uchebnoe posobie. Avtory I.S. Tropin, O.I. Mihajlova, A.V. Mihajlov. Moskva, 2008.

4. Nazyrova, R.R. Termodinamicheskie svojstva individual'nyh veshhestv [Tekst] V 3 kn. / R.R. Nazyrova. – Kazan' : Izd-vo Kazanskogo un-ta, 2006. – 300 s.

5. Jelementy C, Si, Ge, Sn, Pb i ih soedinenija. Tablicy termodinamicheskikh svojstv [Tekst]: sprav. izd. / L. V. Gurvich, I. V. Vejc, V. A. Medvedev i dr.: – M. : Nauka, 1979. - 341 s.

6. Jelementy B, Al, Ga, In, Tl, Be, Mg, Ca, Sr, Ba i ih soedinenija. Tablicy termodinamicheskikh svojstv [Tekst]: sprav. izd. / L. V. Gurvich, I. V. Vejc, V. A. Medvedev i dr.: – M. : Nauka, 1981. - 396 s.

7. Jelementy Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, Ti, Zr, Hf, Sc, U, Za, Th, I, Pu, Zi, Na, K, Rb, Cs i ih soedinenija. Tablicy termodinamicheskikh svojstv [Tekst]: sprav. izd. / L. V. Gurvich, I. V. Vejc, V. A. Medvedev i dr.: – M. : Nauka, 1982. - 560 s.

8. Verjatin, U.D. i dr. -Termodinamicheskie svojstva neorganicheskikh veshhestv : sprav. izd. [Tekst] / U.D. Verjatin, V.P. Mashirev, N.G. Rjabcev i dr. – M. : Atomizdat, 1971. – 461 s.

9. Termicheskie konstanty veshhestv : Spravochnik v 10-ti vyp. [Tekst]: sprav. izd. / V. A. Medvedev i dr.; Pod red. V. P. Glushko (otv. red.). – M: B.и., 1981. – 299 s.

10. Tamm M.E., Tret'jakov Ju.D. Neorganicheskaja himija: V 3-h t. T. 1: Fiziko-himicheskie osnovy neorganicheskij himii: Uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij Pod red. Ju.D.Tret'jakova Izdatel'skij centr "Akademija", 2004. - 240 s. ISBN 5-7695-1446-9

11. http://www.engr.sjsu.edu/ellingham/ellingham_tool_p1.php

Tsymay Dmitry Valeriyovich

FGOU VPO «State University - UNPK», Orel

Ph.D., associate professor

E-mail: dmitryzy@gmail.com

Frolenkov Konstantin Yurievich

FGOU VPO «State University - UNPK», Orel

Ph.D., associate professor

E-mail: chemistry@ostu.ru

ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ПОЛОГИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Предлагается способ получения уравнений процесса нагружения прямоугольных в плане пологих оболочек при двустороннем сжатии при их расчете вариационными методами. Задача решена с учетом геометрической нелинейности. Дается методика определения аппроксимирующих функций в выражениях для перемещений.

Ключевые слова: пологая оболочка, вариационные методы, процесс нагружения.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается пологая цилиндрическая панель (см. рис. 1), находящаяся под действием равномерно распределенных нагрузок p_x и p_y приложенных с эксцентриситетом z_p . Панель имеет в плане прямоугольную форму с размерами a и b . Задача решается в перемещениях с учетом геометрической нелинейности.

При исследовании устойчивости и закритического поведения прямоугольных в плане пологих оболочек с учетом физической и геометрической нелинейностей очень часто используются вариационные методы. При этом задачу удобнее всего решать в перемещениях, так как это позволяет наложить на них такие условия, которые соответствуют реальному закреплению краев оболочки.

В статье предлагается способ получения уравнений процесса нагружения рассматриваемой оболочки на основе вариационного уравнения Лагранжа.

Выражения для перемещений обычно выбираются в виде рядов, представляющих собой произведение постоянных коэффициентов на известные аппроксимирующие функции, удовлетворяющие геометрическим граничным условиям. Выбор этих функций требует очень тщательного подхода, поскольку от него зависит точность, трудоемкость, сходимость и достоверность решения [5, 6, 8]. При удачном выборе аппроксимирующих функций можно получить удовлетворительное решение задачи, даже если ограничиться одним членом ряда. При неудачном их выборе можно получить плохо сходящиеся, и даже расходящиеся ряды [7, 8].

В настоящей статье предлагается методика определения аппроксимирующих функций относительно простая и наиболее рациональная с точки зрения сходимости и достоверности решения. Она является итогом обобщения работ П.Ф. Папковича [9], М.С. Корнишина [5, 6], П.А. Лукаша [7, 8], В.В. Петрова [10] и др. Эта методика является рациональной и потому, что позволяет относительно просто определить деформации в оболочке.

Вследствие гипотезы прямых нормалей достаточно знать перемещения точек срединной поверхности оболочки. Эти перемещения и соответствующие аппроксимирующие функции будем определять на основании дифференциальных уравнений равновесия, записанных в перемещениях, для упругих оболочек. Эти уравнения существенно нелинейные, так как при их получении в выражениях для деформаций точек срединной поверхности учитываются общепринятые нелинейные слагаемые [3, 5, 8, 10]. Что касается выражений для кривизн изгиба и кручения точек срединной поверхности, то они традиционно линейные, однако помимо общепринятых слагаемых, выражающихся через вторые производные от прогиба, в данной работе учтены слагаемые содержащие квадраты и произведения кривизн оболочки. Если исследуется процесс нагружения оболочки, то эти слагаемые могут сыграть существенную роль в начале процесса нагружения, а значит повлиять и на весь последующий процесс.

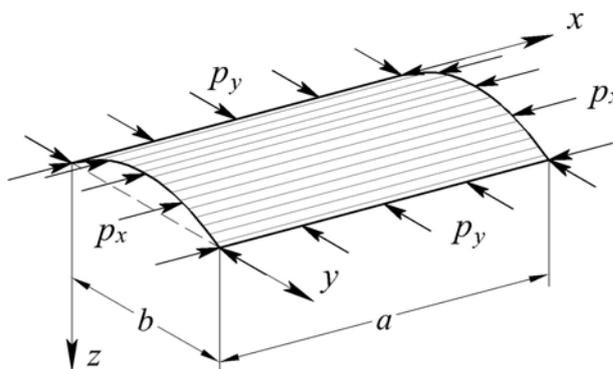


Рисунок 1 – Расчетная схема панели

1. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ

Для решения задачи используется вариационное уравнение Лагранжа

$$\delta U = \delta W,$$

где

$$\delta U = \int_0^a \int_0^b (N_x \delta \varepsilon_x + N_y \delta \varepsilon_y + N_{xy} \delta \gamma_{xy} + M_x \delta \varepsilon_x + M_y \delta \varepsilon_y + 2M_{xy} \delta \varepsilon_{xy}) dx dy$$

– работа внутренних сил на возможных перемещениях;

$$\delta W = \int_0^a \int_0^b q \delta w dx dy + \int_0^b (p_x \delta u - m_x \delta \theta_x) dy \Big|_{x=0}^{x=a} + \int_0^a (p_y \delta v - m_y \delta \theta_y) dx \Big|_{y=0}^{y=b}$$

– работа внешних сил на возможных перемещениях;

N_x, N_y – нормальные силы;

N_{xy} – сдвигающее усилие;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – относительные удлинения;

$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ – сдвиг между координатными направлениями x, y, z ;

M_x, M_y – изгибающие моменты;

M_{xy} – крутящий момент;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – кривизны изгиба срединной поверхности;

$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$ – кривизны кручения;

u, v, w – перемещения точек срединной поверхности в координатных направлениях;

θ_x, θ_y – углы поворота нормалей в координатных направлениях.

Задача решается в перемещениях. Выражения для перемещений представляются в виде двойных рядов

$$u = A_{kl} u_{kl}(x; y), \quad v = B_{kl} v_{kl}(x; y), \quad w = f_{kl} w_{kl}(x; y), \quad (1)$$

где A_{kl}, B_{kl}, f_{kl} – неизвестные коэффициенты (используется правило суммирования по повторяющемуся индексу);

u_{kl}, v_{kl}, w_{kl} – известные функции, выбираемые так, чтобы обязательно удовлетворялись геометрические граничные условия соответствующей краевой задачи.

Зная перемещения, можно определить деформации, углы поворота нормалей и кривизны [2, 5, 8, 10]:

$$\varepsilon_x = u_{,x} + \frac{1}{2} w_{,x}^2 - k_x w, \quad \varepsilon_y = v_{,y} + \frac{1}{2} w_{,y}^2 - k_y w, \quad 2\varepsilon_{xy} = \gamma_{xy} = u_{,y} + v_{,x} + w_{,x} w_{,y}, \quad (2)$$

$$\theta_x = w_{,x}, \quad \theta_y = w_{,y}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_x = -w_{,xx} - k_x^2 w, \quad \varepsilon_y = -w_{,yy} - k_y^2 w, \quad \varepsilon_{xy} = -w_{,xy} - k_{xy}^2 w. \quad (4)$$

Буквы после запятой указывают, по какой из координат производится дифференцирование. Из (2)-(4) с учетом (1) следует

$$\delta u = \delta A_{kl} u_{kl}(x; y), \quad \delta v = \delta B_{kl} v_{kl}(x; y), \quad \delta w = \delta f_{kl} w_{kl}(x; y),$$

$$\delta \varepsilon_x = \delta A_{kl} u_{kl,xx} + \theta_x \delta f_{kl} w_{kl,xx} - k_x \delta f_{kl} w_{kl}, \quad \delta \varepsilon_y = \delta B_{kl} v_{kl,yy} + \theta_y \delta f_{kl} w_{kl,yy} - k_y \delta f_{kl} w_{kl},$$

$$\delta \gamma_{xy} = \delta A_{kl} u_{kl,y} + \delta B_{kl} v_{kl,x} + \theta_x \delta f_{kl} w_{kl,y} + \theta_y \delta f_{kl} w_{kl,x},$$

$$\delta \theta_x = \delta f_{kl} w_{kl,x}, \quad \delta \theta_y = \delta f_{kl} w_{kl,y},$$

$$\delta \varepsilon_x = -\delta f_{kl} w_{kl,xx} - k_x^2 \delta f_{kl} w_{kl}, \quad \delta \varepsilon_y = -\delta f_{kl} w_{kl,yy} - k_y^2 \delta f_{kl} w_{kl}, \quad \delta \varepsilon_{xy} = -\delta f_{kl} w_{kl,xy} - k_{xy}^2 \delta f_{kl} w_{kl}.$$

Вариации перемещений, деформаций и кривизн вводим в вариационное уравнение Лагранжа. Так как вариации коэффициентов произвольны и независимы, то равенство выполняется, если равны выражения при вариациях одинаковых коэффициентов $\delta A_{kl}, \delta B_{kl}, \delta f_{kl}$. Отсюда получаем интегральные условия минимума полной потенциальной энергии оболочки:

$$\int_0^a \int_0^b (N_x u_{kl,x} + N_{xy} u_{kl,y}) dx dy = \int_0^b p_x u_{kl} dy \Big|_{x=0}^{x=a}, \quad (5)$$

$$\int_0^a \int_0^b (N_{xy} v_{kl,x} + N_y v_{kl,y}) dx dy = \int_0^a p_y v_{kl} dx \Big|_{y=0}^{y=b}, \quad (6)$$

$$\int_0^a \int_0^b \left[(N_x \theta_x + N_{xy} \theta_y) w_{kl,x} + (N_y \theta_y + N_{xy} \theta_x) w_{kl,y} - (k_x N_x + k_y N_y) w_{kl} - M_x (w_{kl,xx} + k_x^2 w_{kl}) - M_y (w_{kl,yy} + k_y^2 w_{kl}) - 2M_{xy} (w_{kl,xy} + k_{xy}^2 w_{kl}) \right] dx dy = \int_0^a \int_0^b q w_{kl} dx dy - \int_0^b m_x w_{kl,x} dy \Big|_{x=0}^{x=a} - \int_0^a m_y w_{kl,y} dx \Big|_{y=0}^{y=b}. \quad (7)$$

Этих условий будет столько, сколько членов ряда удержано в выражениях для перемещений. Полученные условия справедливы для любой оболочки: упругой, нелинейно-упругой, упругопластической и т.д.

Далее, выражая внутренние усилия через перемещения на основании выражений (1)-(4) и подставляя эти выражения в условия (5)-(7), получим систему нелинейных неоднородных алгебраических уравнений для определения искомым коэффициентов A_{kl} , B_{kl} , f_{kl} . Таким образом, перемещения будут известны.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ В ВЫРАЖЕНИИ ДЛЯ ПРОГИБА

Из трех составляющих перемещения произвольной точки срединной поверхности оболочки легче всего подобрать приближенные выражения для прогиба $w(x, y)$ вследствие его наглядности и доступности экспериментальному наблюдению [7, 8]. Представляем его в виде ряда [3, 5, 7, 10]

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n f_{mn} X_m(x) Y_n(y). \quad (8)$$

В качестве функций X_m и Y_n выбираются [4, 5, 7, 10]: стержневые функции, статические и динамические балочные функции, тригонометрические функции и др. Однако в соответствии с теоремой С.Г. Михлина о сходимости решения с учётом своеобразия формы оболочки за функции X_m и Y_n рекомендуется выбирать функции, соответствующие решению родственных одномерных задач. В связи с этим, записываем дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности оболочки

$$\nabla^2 \nabla^2 w + 2(k_x^2 + k_y^2) \nabla^2 w + (k_x^2 + k_y^2)^2 w - (k_x + w_{,xx} + k_x^2 w) \frac{N_x}{D} - (k_y + w_{,yy} + k_y^2 w) \frac{N_y}{D} - 2w_{,xy} \frac{N_{xy}}{D} = \frac{1}{D} q(x, y), \quad (9)$$

где ∇^2 – гармонический оператор, $\nabla^2 w = w_{,xx} + w_{,yy}$;

k_x, k_y – кривизны оболочки, которые считаем постоянными (оболочки переноса);

D – цилиндрическая жесткость;

$q(x, y)$ – интенсивность поперечной нагрузки.

В отличие от общепринятого уравнения для прогиба [3, 5, 7] уравнение (9) содержит слагаемые, соответствующие вторым слагаемым в выражениях для кривизн изгиба и кручения срединной поверхности [2, 7]

$$\alpha_x = -w_{,xx} - k_x^2 w, \quad \alpha_y = -w_{,yy} - k_y^2 w, \quad \alpha_{xy} = -w_{,xy} - k_x k_y w.$$

Полагая, что в продольном направлении (в направлении оси x) справедливы условия цилиндрического изгиба [10] и принимая $w = X(x)$, получим на основании уравнения (9)

$$X^{IV} + 2k_x^2 X'' + k_x^4 X - (k_x + X'' + k_x^2 X) \frac{N_x}{D} = \frac{1}{D} q(x). \quad (10)$$

Здесь римские цифры означают дифференцирование по координатам x и y . Уравнение (10) есть уравнение продольно-поперечного изгиба арки единичной ширины расположенной в плоскости, перпендикулярной оси y . В частности, для цилиндрической панели ($k_x = 0$)

$$X^{IV} - \frac{N_x}{D} X'' = \frac{1}{D} q(x). \quad (11)$$

Это уравнение описывает продольно-поперечный изгиб балки-полоски единичной ширины, ось которой параллельна оси x .

Полагая, что условия цилиндрического изгиба справедливы для оболочки в поперечном направлении (в направлении оси y) [10] и принимая $w = Y(y)$, получим из (9)

$$Y^{IV} + 2k_y^2 Y'' + k_y^4 Y - (k_y + Y'' + k_y^2 Y) \frac{N_y}{D} = \frac{1}{D} q(y). \quad (12)$$

Это уравнение есть уравнение продольно-поперечного изгиба арки единичной ширины расположенной в плоскости, перпендикулярной оси x .

Обыкновенные дифференциальные уравнения (10)-(12) и используются для определения функций $X_m(x)$ и $Y_n(y)$, входящих в ряд (8).

В дальнейшем для упрощения вычислений и записи уравнений и решений вводим безразмерные координаты [4, 5, 7, 10] $\bar{x} = x/a$, $\bar{y} = y/b$, $0 \leq \bar{x}, \bar{y} \leq 1$, где a и b – размеры оболочки в плане (рис. 1).

При введении безразмерных координат уравнения (10)-(12) запишутся так

$$X^{IV} + (2\bar{k}_x^2 - \lambda_x^2) X'' + \bar{k}_x^2 (\bar{k}_x^2 - \lambda_x^2) X = \bar{k}_x \lambda_x^2 a + \frac{a^4}{D} q(\bar{x}),$$

$$X^{IV} - \lambda_x^2 X'' = \frac{a^4}{D} q(\bar{x}),$$

$$Y^{IV} + (2\bar{k}_y^2 - \nu_y^2) Y'' + \bar{k}_y^2 (\bar{k}_y^2 - \nu_y^2) Y = \bar{k}_y \nu_y^2 b + \frac{b^4}{D} q(\bar{y}).$$

Здесь введены обозначения

$$\bar{k}_x = k_x a, \quad \bar{k}_y = k_y b, \quad \lambda_x^2 = \lambda^2 \text{sign} N_x, \quad \nu_y^2 = \nu^2 \text{sign} N_y, \\ \lambda^2 = \frac{|N_x| a^2}{D}, \quad \nu^2 = \frac{|N_y| b^2}{D}, \quad \text{sign} N = \begin{cases} +1, & \text{если } N > 0, \\ -1, & \text{если } N < 0. \end{cases}$$

Предположим, что поперечная нагрузка отсутствует, т.е. $q(\bar{x}) = q(\bar{y}) = 0$, N_x и N_y отрицательные, что имеет место при продольной сжимающей нагрузке. Тогда решение записанных уравнений имеет вид

$$X(\bar{x}) = C_1 \sin \bar{k}_x \bar{x} + C_2 \cos \bar{k}_x \bar{x} + C_3 \sin \lambda_0 \bar{x} + C_4 \cos \lambda_0 \bar{x} - \frac{\lambda^2 a}{\bar{k}_x \lambda_0^2},$$

$$X(\bar{x}) = C_1^0 \sin \lambda \bar{x} + C_2^0 \cos \lambda \bar{x} + C_3^0 \bar{x} + C_4^0,$$

$$Y(\bar{y}) = C_1 \sin \bar{k}_y \bar{y} + C_2 \cos \bar{k}_y \bar{y} + C_3 \sin \nu_0 \bar{y} + C_4 \cos \nu_0 \bar{y} - \frac{\nu^2 b}{\bar{k}_y \nu_0^2},$$

здесь $\lambda_0^2 = \lambda^2 + \bar{k}_x^2$, $\nu_0^2 = \nu^2 + \bar{k}_y^2$. Постоянные интегрирования C_i определяются из граничных условий, накладываемых на прогиб. Для функций $X(\bar{x})$ эти условия такие же, как и на поперечных краях оболочки, а для функций $Y(\bar{y})$ – как на продольных краях.

Подчинив полученные выражения граничным условиям, найдем постоянные интегрирования. Определив функции $X_m(\bar{x})$ и $Y_n(\bar{y})$ для соответствующей краевой задачи, мы получим выражение (8) для прогиба, т.е. он будет известен.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ КАСАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Для определения этих функций воспользуемся идеями П.Ф. Папковича [9] и М.С. Корнишина [5, 6]. Следуя Корнишину, представляем касательные перемещения в виде

$$u(\bar{x}, \bar{y}) = u_0(\bar{x}, \bar{y}) + \bar{k}_x \int w(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} - \frac{1}{2a} \int w_{,\bar{x}}^2 d\bar{x}, \quad (13)$$

$$v(\bar{x}, \bar{y}) = v_0(\bar{x}, \bar{y}) + \bar{k}_y \int w(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{y} - \frac{1}{2b} \int w_{,\bar{y}}^2 d\bar{y}. \quad (14)$$

Первые слагаемые в этих выражениях представляют перемещения, соответствующие растяжению-сжатию и сдвигу оболочки; вторые и третьи слагаемые – ее изгибу. Как показывает практика расчета упругих оболочек и пластин [5, 6], представление перемещений в таком виде обеспечивает значительно более быструю сходимость, чем обычное их представление в виде тригонометрических рядов.

При известном выражении для прогиба, вторые и третьи слагаемые в (13) и (14) известны. Для определения функций $u_0(\bar{x}, \bar{y})$ и $v_0(\bar{x}, \bar{y})$ имеем такие уравнения [5, 7, 10]

$$\nabla_1 u_0 + \nabla_0 v_0 = -\mu_1 \frac{1}{b} \int (\nabla_x^2 w + \nabla_k^2 w) d\bar{x}, \quad \nabla_2 v_0 + \nabla_0 u_0 = -\mu_1 \frac{1}{a} \int (\nabla_x^2 w + \nabla_k^2 w) d\bar{y}, \quad (15)$$

где для произвольной функции $f(\bar{x}, \bar{y})$

$$\nabla_1 f = \alpha_0 f_{,\bar{x}\bar{x}} + \mu_1 \alpha f_{,\bar{y}\bar{y}}, \quad \nabla_2 f = \alpha f_{,\bar{y}\bar{y}} + \mu_1 \alpha_0 f_{,\bar{x}\bar{x}}, \quad \nabla_0 f = \mu_2 f_{,\bar{x}\bar{y}}, \quad (16)$$

а остальные операторы известны [10]

$$\nabla_x^2 w = w_{,\bar{x}\bar{x}} w_{,\bar{y}\bar{y}} - w_{,\bar{x}\bar{y}}^2, \quad \nabla_k^2 w = a \bar{k}_x w_{,\bar{y}\bar{y}} + b \bar{k}_y w_{,\bar{x}\bar{x}}. \quad (17)$$

В (16) и (17) введены обозначения $\alpha = a/b$, $\alpha_0 = b/a$, $\mu_1 = 0,5 \cdot (1 - \mu)$, $\mu_2 = 0,5 \cdot (1 + \mu)$; где μ – коэффициент Пуассона материала оболочки.

Вводим функции перемещений $\varphi_0(\bar{x}, \bar{y})$ и $\psi_0(\bar{x}, \bar{y})$ таким образом

$$u_0 = \nabla_2 \varphi_0 - \nabla_0 \psi_0, \quad v_0 = \nabla_1 \psi_0 - \nabla_0 \varphi_0. \quad (18)$$

Тогда вместо системы двух уравнений (15) с двумя неизвестными функциями получаем два самостоятельных бигармонических уравнения относительно введенных функций

$$\nabla^4 \varphi_0 = -\frac{1}{b} \int (\nabla_x^2 w + \nabla_k^2 w) d\bar{x}, \quad \nabla^4 \psi_0 = -\frac{1}{a} \int (\nabla_x^2 w + \nabla_k^2 w) d\bar{y},$$

где для произвольной функции $f(\bar{x}, \bar{y})$

$$\nabla^4 f = \alpha_0^2 \frac{\partial^4 f}{\partial \bar{x}^4} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{y}^2} + \alpha^2 \frac{\partial^4 f}{\partial \bar{y}^4}.$$

Определение двух функций можно свести к определению одной, если предположить, что

$$\varphi_0 = \frac{1}{b} \int \Psi(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x}, \quad \psi_0 = \frac{1}{a} \int \Psi(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{y}. \quad (19)$$

Новая функция перемещений $\Psi(\bar{x}, \bar{y})$ должна удовлетворять уравнению

$$\nabla^4 \Psi = -\nabla_x^2 w - \nabla_k^2 w. \quad (20)$$

Интересно, что с точностью до постоянного в правой части множителя $B_0 = Eh$ (E – модуль упругости, h – толщина оболочки) это уравнение совпадает с дифференциальным уравнением для функции усилий $\Phi(\bar{x}, \bar{y})$ – вторым основным уравнением теории оболочек при решении в смешанной форме [3, 5, 7, 10]. Подставляем (19) в (18), получаем для функций $u_0(\bar{x}, \bar{y})$ и $v_0(\bar{x}, \bar{y})$ такие выражения

$$u_0 = \frac{1}{b} \int (\alpha \Psi_{,\bar{y}\bar{y}} - \mu \alpha_0 \Psi_{,\bar{x}\bar{x}}) d\bar{x}, \quad v_0 = \frac{1}{a} \int (\alpha_0 \Psi_{,\bar{x}\bar{x}} - \mu \alpha \Psi_{,\bar{y}\bar{y}}) d\bar{y}. \quad (21)$$

Определив функцию перемещений $\Psi(\bar{x}, \bar{y})$, можно определить и деформации срединной поверхности оболочки:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{ab} (\alpha \Psi_{,\bar{y}\bar{y}} - \mu \alpha_0 \Psi_{,\bar{x}\bar{x}}), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{ab} (\alpha_0 \Psi_{,\bar{x}\bar{x}} - \mu \alpha \Psi_{,\bar{y}\bar{y}}), \quad \gamma_{xy} = -2(1 + \mu) \frac{1}{ab} \Psi_{,\bar{x}\bar{y}}. \quad (22)$$

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Перемещения и деформации, определяемые по формулам (21) и (22), соответствуют сугубо частному закреплению краев оболочки, которое далеко не всегда отражает реальное

их закрепление. Чтобы устранить этот недостаток, представим, следуя М.С. Корнишину [5, б], функцию перемещений в виде

$$\Psi(\bar{x}, \bar{y}) = \Psi_0(\bar{x}, \bar{y}) + \int \varphi_k(\bar{y}) d\bar{y} + \int \psi_k(\bar{x}) d\bar{x},$$

где $\Psi_0(\bar{x}, \bar{y})$ – общее решение неоднородного бигармонического уравнения (20);

$\varphi_k(\bar{y})$, $\psi_k(\bar{x})$ – неизвестные функции, подлежащие определению из геометрических граничных условий, накладываемых на касательные перемещения.

Кроме того, в выражения для перемещений (13), (14) добавим, соответственно, функции $f_k(\bar{y})$ и $g_k(\bar{x})$. В результате получим

$$u(\bar{x}, \bar{y}) = U(\bar{x}, \bar{y}) + f_k(\bar{y}) + \frac{1}{b} [\alpha \bar{x} \varphi'_k(\bar{y}) - \mu \alpha_0 \psi_k(\bar{x})],$$

$$v(\bar{x}, \bar{y}) = V(\bar{x}, \bar{y}) + g_k(\bar{x}) + \frac{1}{a} [\alpha_0 \bar{y} \psi'_k(\bar{x}) - \mu \alpha \varphi_k(\bar{y})].$$

Здесь $U(\bar{x}, \bar{y}) = U_0(\bar{x}, \bar{y}) + U_1(\bar{x}, \bar{y})$, $V(\bar{x}, \bar{y}) = V_0(\bar{x}, \bar{y}) + V_1(\bar{x}, \bar{y})$. Функции $U_0(\bar{x}, \bar{y})$ и $V_0(\bar{x}, \bar{y})$ определяются на основании формул (21), в которых $\Psi(\bar{x}, \bar{y})$ надо заменить на $\Psi_0(\bar{x}, \bar{y})$.

Функции $U_1(\bar{x}, \bar{y})$ и $V_1(\bar{x}, \bar{y})$ определяются так

$$U_1 = \int \left(\bar{k}_x w - \frac{1}{2a} w_{,\bar{x}}^2 \right) d\bar{x}, \quad V_1 = \int \left(\bar{k}_y w - \frac{1}{2b} w_{,\bar{y}}^2 \right) d\bar{y}.$$

Наличие функций $f_k(\bar{y})$, $g_k(\bar{x})$, $\varphi_k(\bar{y})$, $\psi_k(\bar{x})$ позволяет удовлетворить любым граничным условиям для касательных перемещений. При их наличии деформации в точках срединной поверхности находятся из выражений

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + \frac{1}{ab} [\alpha \varphi'_k(\bar{y}) - \mu \alpha_0 \psi'_k(\bar{x})], \quad \varepsilon_y = \varepsilon_y^0 + \frac{1}{ab} [\alpha_0 \psi'_k(\bar{x}) - \mu \alpha \varphi'_k(\bar{y})],$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + \frac{1}{b} f'_k(\bar{y}) + \frac{1}{a} g'_k(\bar{x}).$$

Деформации ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy}^0 соответствуют общему решению $\Psi_0(\bar{x}, \bar{y})$ уравнения (20) и определяются на основании формул (22) с заменой $\Psi(\bar{x}, \bar{y})$ на $\Psi_0(\bar{x}, \bar{y})$.

Конкретные примеры определения функций $f_k(\bar{y})$, $g_k(\bar{x})$, $\varphi_k(\bar{y})$, $\psi_k(\bar{x})$, соответствующих реальному закреплению краев оболочки, приведены в статье [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный вариационный метод решения задачи об исследовании процесса нагружения пологих цилиндрических панелей позволяет относительно просто получить систему разрешающих уравнений этого процесса.

Методика определения аппроксимирующих функций в выражениях для перемещений является относительно простой и наиболее рациональной для получения достоверного сходящегося решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин, В.П. Определение аппроксимирующих функций в выражениях для перемещений при расчете пологих оболочек / В.П. Володин, Э.Р. Надиров // Вестник Тверского государственного университета: научный журнал. Серия «Прикладная математика» – Тверь: ТвГУ, 2012. – №17. – Вып. 2 (25). – С. 41 – 51.
2. Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 421 с.
3. Зубчанинов, В.Г. Основы теории упругости и пластичности / В.Г. Зубчанинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.
4. Иванов, В.Н. Вариационные принципы и методы решения задач теории упругости / В.Н. Иванов. – М.: Изд-во РУДН, 2001. – 176 с.
5. Корнишин, М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения / М.С. Корнишин. – М.: Наука, 1964. – 194 с.
6. Корнишин, М.С. О выборе выражений для касательных составляющих перемещений при решении задач теории оболочек вариационными методами / М.С. Корнишин // Изв. Казанск. филиала АН СССР, серия физ.-мат. и техн. наук. 1959. – Вып. 12. – С. 101–105.
7. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.

8. Лукаш П.А. Расчет пологих оболочек и плит с учетом физической и геометрической нелинейности / П.А. Лукаш // В кн.: Труды ЦНИИСК. Расчет конструкций работающих в упруго-пластической стадии. М.: Ростройиздат. 1961. – Вып. – 7. С. 268–320.

9. Папкович, П.Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4 т. / П.Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1963. Т. 4: Устойчивость стержней, перекрытий и пластин. – 551 с.

10. Петров, В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек / В.В. Петров. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 119 с.

Володин Вячеслав Петрович

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Кандидат технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности

Тел. 8(4822)52-63-63

Надилов Эмин Рафаэлович

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Ассистент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности

Тел. 8-910-931-53-32

E-mail: n-emin@mail.ru

V.P. VOLODIN, E.R. NADIROV

**VARIATION METHOD OF THE STUDY PROCESS LOADING GENTLE
CYLINDRICAL SHELLS**

Provides a method of obtaining the equations of the loading process rectangular in plan shallow shells with bilateral compression in their calculation variational methods. The problem is solved with the geometric nonlinearity. The technique of determining the approximating functions in the expressions for the displacements.

Keywords: shallow shell, variational methods, loading process.

BIBLIOGRAPHY

1. Volodin, V.P. Opredelenie approksimirujushhijh funkcij v vyrazhenijah dlja peremeshhenij pri ras-chete pologih obolochek / V.P. Volodin, Je.R. Nadirov // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta: nauchnyj zhurnal. Serija «Prikladnaja matematika» – Tver': TvGU, 2012. – №17. – Vyp. 2 (25). – S. 41 – 51.

2. Vol'mir, A.S. Gibkie plastinki i obolochki / A.S. Vol'mir. – M.: GITTL, 1956. – 421 s.

3. Zubchaninov, V.G. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti / V.G. Zubchaninov. – M.: Vysshaja shkola, 1990. – 368 s.

4. Ivanov, V.N. Variacionnye principy i metody reshenija zadach teorii uprugosti' / V.N. Ivanov. – M.: Izd-vo RUDN, 2001. – 176 s.

5. Kornishin, M.S. Nelinejnye zadachi teorii plastin i pologih obolochek i metody ih reshenija / M.S. Kornishin. – M.: Nauka, 1964. – 194 s.

6. Kornishin, M.S. O vybore vyrazhenij dlja kasatel'nyh sostavljajushhijh peremeshhenij pri reshenii zadach teorii obolochek variacionnymi metodami / M.S. Kornishin // Izv. Kazansk. filiala AN SSSR, serija fiz.-mat. i tehn. nauk. 1959. – Vyp. 12. – S. 101–105.

7. Lukash, P.A. Osnovy nelinejnoj stroitel'noj mehaniki / P.A. Lukash. – M.: Strojizdat, 1978. – 208 s.

8. Lukash P.A. Raschet pologih obolochek i plit s uchetom fizicheskoj i geometricheskoj nelinejnosti / P.A. Lukash // V kn.: Trudy CNIISK. Raschet konstrukcij rabotajushhijh v uprugoplasticheskoj stadii. M.: Ros-strojizdat. 1961. – Vyp. – 7. S. 268–320.

9. Papkovich, P.F. Trudy po stroitel'noj mehanike korablja: v 4 t. / P.F. Papkovich. – L.: Sudpromgiz, 1963. Т. 4: Ustojchivost' stержnej, perekrytij i plastin. – 551 с.

10. Petrov, V.V. Metod posledovatel'nyh nagruzhenij v nelinejnoj teorii plastinok i obolochek / V.V. Petrov. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 119 s.

Volodin Vyacheslav Petrovich

The Tver state technical University, str. Tver

Candidate of technical sciences, professor of the department strength of materials, theory of elasticity and plasticity

Tel. 8(4822)52-63-63

Nadirov Emin Rafaelovich

The Tver state technical University, str. Tver

assistant of the department strength of materials, theory of elasticity and plasticity

Tel. 8-910-931-53-32

E-mail: n-emin@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.511.3:004.822

Д.А. АНДРЕЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ В ОНТОЛОГИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ

Представлен аналитический обзор ключевых подходов к формализованному описанию технологических процессов. Рассмотрена модель онтологического представления произвольной технологии на любом этапе её декомпозиции. Реализована модернизация процедурного механизма построения онтологий технологических действий, которая обусловлена учётом их темпоральных особенностей. Предложена обобщённая модель онтологической системы представления технологических знаний.

Ключевые слова: онтология; декомпозиционная конструкция; технологическое действие; временной интервал; темпоральная пара.

ВВЕДЕНИЕ

Все существующие отношения в сфере взаимодействия человеческого общества с окружающей природной средой, в полной мере, взаимосвязаны и взаимообусловлены, имеют закономерные пути и объективные информационно-материальные схемы их разумного преобразования в интересах антропогенной деятельности, т.е. то, что, в общепризнанном сознании, принято называть технологиями.

За прошедший период исторического пути развития технология, как категория бытия, подверглась кардинальным изменениям. Если ранее под технологией подразумевался простой, уникальный в своём роде, навык, то уже сейчас технология является, по сути, сложным комплексом знаний, обычно получаемых с помощью специальных исследований. Другими словами, своим происхождением технологии обязаны искусствам (умениям) мастеров в отдельных областях жизнедеятельности, поскольку именно технологический подход фактически создал человеческую цивилизацию в её нынешнем виде, и, к тому же, постоянно способствует её дальнейшему функционированию и совершенствованию.

Итак, объектом данного исследования являются технологии.

К настоящему моменту термин «технология» получил повсеместное распространение, практически во всех сферах деятельности человека, где отчетливо прослеживаются стремления к определённым целям и конечным результатам, начиная от традиционного понимания технологий в промышленности и заканчивая современным толкованием информационных технологий в образовании, сфере услуг и т.п. Однако в данной статье будут рассматриваться технологии, реализуемые в целях конкретной деятельности, а именно технологии материального производства [1].

С этих позиций под термином «технология» стоит понимать, объём знаний о том, каким образом происходит качественное преобразование некоторой совокупности компонентов, называемых исходными (сырьё, материалов и т.п.), в определённую совокупность компонентов, называемых результирующими (полуфабрикаты, готовые продукты и т.п.). На практике вместо обсуждаемого понятия обычно используют термин «технологический процесс», который, по большей части, также будет использоваться при дальнейшем изложении содержания данной работы. Дело в том, что традиционно данным термином называют основную процесс, в результате которого собственно и реализуется технология [2].

В современном мире знания о технологиях с полной уверенностью можно отнести к ценнейшей информации, поскольку наряду с битвами за материальные блага усиленными темпами ведётся ожесточённая борьба за обладание информационными ресурсами, среди которых информация о технологиях занимает передовую позицию. При этом оперирование

информацией, всё в большей мере, производится с помощью информационно-телекоммуникационной техники (ИКТ). Фиксация же информации о технологиях может происходить посредством различных способов их описания, которые достаточно разнородны с позиций уровня формализации, причём возможность машинного манипулирования технологическими знаниями определяется средствами, методами, инструментальным аппаратом формализации этих знаний [3].

Важно отметить, что эффективность от использования существующих способов, даже при использовании электронных вычислительных машин (ЭВМ), постепенно снижается по мере постоянно расширяющегося объёма технологических знаний. Такое положение вещей является сдерживающим фактором развития систем формализованного описания технологий, способных в полной мере отобразить логику пространственно-временных отношений, которые имеют место быть среди всех компонентов, участвующих в соответствующих технологических процессах.

Таким образом, предметом данного исследования являются способы представления знаний о технологиях.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ФОРМАЛИЗОВАННОМУ ОПИСАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Проблема формализации технологических знаний, находящаяся, по большей части, в области системного анализа и проектирования, является предметом целого ряда прикладных исследований уже на протяжении нескольких десятилетий.

Изначально основным аппаратом формализованного описания технологических процессов являлись традиционные математические модели. Однако они позволили формализовать только относительно небольшую часть технологических знаний, главным образом, связанных с физико-химическими процессами. Большая же часть обсуждаемых знаний осталась неформализованной. Это объясняется, прежде всего, несовершенством аппарата, который не предназначен для описания и учета всех имеющихся особенностей у технологических процессов [4].

Последующим этапом в разрешении рассматриваемой проблемы явилось повышение уровня структуризации описаний, за счёт создания логико-символьных языков для структурного отображения технологий [5]. Использование их аналитического аппарата привело к большей точности в соответствующих описаниях и, как следствие, к повышению адекватности их интерпретации. Развитие данного этапа было ознаменовано появлением нотаций графического описания процессов, в целях проведения их наибольшей визуализации [6]. Подобные инструментарии предоставляют экспертам широкий спектр систем условных обозначений для документирования технологических знаний, с выделением структурных единиц описания и наведением возможных отношений между ними. В то же время существенным недостатком графических нотаций является отсутствие механизма взаимнооднозначного определения отношений между отдельными сущностями посредством их характеристических признаков.

В последние годы в вопросе формализации технологических знаний в аспекте их структурного представления получили развитие методологические концепции, основанные на онтологиях. Данное обстоятельство выглядит закономерным, поскольку именно онтологии предоставляют возможность всеобъемлющей и детальной формализации некоторой области знаний с помощью концептуальных схем, представляющих собой системы взаимосвязанных по определенным правилам понятий [7]. Технология же нуждается в обязательной онтологизации перед её широким применением, при этом, в случае выхода технологии за пределы антропоцентричных представлений, онтологизация становится единственным способом понять саму технологию и овладеть её сутью [8].

В рамках данного подхода можно выделить два приоритетных направления:

- Создание специализированных систем визуализации технологических знаний, с поддержкой стандартов их исследования онтологической направленности [9]. Однако выде-

ление в процессе описания так называемых промежуточных этапов (операций, переходов и т.п.), описываемых в виде отдельных процедур, указывает на отсутствие унифицированного подхода в вопросе представления структурных элементов и не позволяет обсуждаемым инструментариям стать универсальными для широкого спектра технологий.

- Построение лексико-грамматических онтологий процессов для конкретных предметных областей [10]. В то же время лексическая многозначность и контекстная зависимость семантики выражений естественного языка создаёт труднопреодолимые проблемы для проектирования однозначно интерпретируемых онтологий, используемых в составе автоматизированных систем накопления технологических знаний.

Важно отметить, что процесс, помимо его материальной сущности, является ещё и времязависимой категорией [11]. Современные подходы к представлению временных зависимостей в области онтологического инжиниринга можно условно разбить на два базовых класса – основанные на моделировании изменений во времени и основанные на явном моделировании времени [12].

В классе методов, использующих моделирование изменений во времени, в качестве базовых примитивов могут быть использованы их временные состояния. К примеру, в [13] эти состояния рассматриваются как мгновенные, т.е. не обладающие какой либо длительностью во времени. Их же изменения во времени описываются отношениями, иллюстрирующими развитие одного состояния в другое и их возможной эквивалентности.

Второй класс методов обладает большими выразительными способностями и базируется на моделях, явным образом представляющих время с учётом его свойств. С одной стороны, для описания логики протекания процессов может быть введена обособленная временная структура (фрейм), посредством которой происходит фиксирование изменений онтологии в строго определённые моменты времени, в частности, как показано в [14]. С другой стороны, само время может быть осмыслено в качестве онтологической структуры [15], посредством определения множества примитивов времени и множества базовых временных отношений, подчинённых законам темпоральной логики [16].

В этой связи представляется весьма актуальной задача разработки метода онтологического описания технологий, заданных в словесной форме и рассматриваемых во всём спектре их возможного применения. Решение поставленной задачи предполагается реализовать посредством насыщения общепризнанного понимания онтологий процессов, где они рассматриваются в качестве материальных сущностей, отношениями временного порядка между соответствующими концептами, что позволит, в полной мере, отобразить пространственно-временную логику протекания и, как следствие, реализации технологий.

МОДЕЛЬ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

Согласно [17] модель онтологического представления произвольной технологии на любом этапе её декомпозиции имеет следующий вид:

$$Ont_{decomp} = \langle TD, F, P_1, P_2 \rangle, \quad (1)$$

где $TD = \langle TP, X, Y, H \rangle$ - множество концептов (концептуальных единиц) технологических действий. Оно определяется совокупностью ядер, ассоциируемых со взаимосвязанными технологическими процессами TP , преобразуемыми в декомпозиционные конструкции, по принципу «матрёшки» [18], со (μ, \dots, ψ) степенью вложенности отдельных TP в вершине с корневыми ядрами $TP_{\alpha, \beta, \dots, \lambda}$, т.е. $TP_{\alpha, \beta, \dots, \lambda} = \bigcup_{\mu, \dots, \psi} TP_{\alpha, \beta, \dots, \lambda, \mu, \dots, \psi}$. Однако интерпретация всех TP

происходит посредством компонентов множеств внешних границ: исходных X и результирующих Y , представляемых для ядер $TP_{\alpha, \beta, \dots, \lambda}$, соответственно, как $X_{0, \alpha, \beta, \dots, \lambda} = \bigcup_{\mu, \dots, \psi} X_{0, \alpha, \beta, \dots, \lambda, \mu, \dots, \psi}$ и $Y_{\alpha, \beta, \dots, \lambda, 0} = \bigcup_{\mu, \dots, \psi} Y_{\alpha, \beta, \dots, \lambda, \mu, \dots, \psi, 0}$. В целях пополнения содержания уже существующей понятийной картины TP , для каждого из них может быть введено множество

собственных характеристик H , представляемого в виде вектора упорядоченных позиций. В частности, для ядер $TP_{\alpha, \dots, \lambda}$ оно будет определяться как $H_{\alpha, \dots, \lambda}$.

F - отношение «подчинения». Под ним понимается онтологическое отношение «часть-целое» с единичным наследованием, реализуемое между корневым концептом и концептами более частного характера, производных от него. Введение отношения F обусловлено необходимостью фиксации степеней вложенности одних TD в другие, с учётом того обстоятельства, что частные концепты будут наследовать лишь часть внешних границ у своего целостного концепта.

P_1 и P_2 - отношение «следования» и «причинно-следственной эквивалентности» соответственно. Их разграничение производится посредством анализа результатов пересечений множеств X и Y у различных концептов TD одного уровня декомпозиции. Другими словами, эти отношения интерпретируют связи обсуждаемых TD через промежуточные материальные объекты множеств X и Y , что вполне соотносится с положением онтологического моделирования предметной области как сферы деятельности [19]. Стоит отметить, что в модели (1) отношения P_1 и P_2 определяют у рассматриваемых TD сугубо пространственный аспект их взаимодействия, обусловленный причинно-следственностью их связей.

Каждая из концептуальных единиц TD в (1), представляющая собой конструктивную модель определённого целенаправленного действия, посредством которого собственно и реализуется воспроизведение описываемого TP , должна также учитывать, как отмечалось ранее, и фактор, характеризующий временем протекания соответствующего TP .

С учётом данного обстоятельства в качестве базового примитива, определяющего темпоральные границы TD , предлагается ввести временной интервал T_{TD} . Этот интервал представляет собой упорядоченную пару (T_{TD}^-, T_{TD}^+) , такую что, $T_{TD}^- < T_{TD}^+$, где T_{TD}^- и T_{TD}^+ рассматриваются как событийные моменты времени начала и конца соответствующего TD на относительной временной шкале [20].

Примечание. В данной статье структура времени определяется как направленная, линейная, однородная, дискретная, конечная.

Для полноценного онтологического моделирования описания технологий с позиций временного аспекта, необходимо введение множества базовых интервальных отношений, которые, могут быть определены через отношения между границами этих интервалов [21].

Бинарный характер темпоральных отношений может быть передан посредством словесно-текстовой интерпретации и соответствующей ей графической иллюстрации на примере, допустим, двух частных концептов TD_1 и TD_2 , полученных в результате декомпозиции исходного корневого концепта TD_0 (табл. 1).

В соответствии с общепризнанными принципами концепций современного естествознания, в том числе, и в вопросе формализованного описания технологий, рассмотрение пространственного и временного аспектов их представления обязано быть комплексным [22]. Иными словами, связи между частными концептуальными единицами TD одного уровня декомпозиции должны интерпретироваться сразу парой отношений, а именно причинно-следственного и темпорального толкования соответственно.

Учитывая вышеизложенные положения, методика проектирования онтологий TD будет усовершенствована, в части содержательного наполнения канонизированных этапов процедуры описания технологий [23]. Общие трактовки данных этапов таковы:

- 1) Формирование компонентов внешних границ у исходного корневого концепта;
- 2) Получение производных концептов первого уровня вложенности;
- 3) Формирование компонентов внешних границ у производных концептов первого уровня вложенности с учётом их взаимосвязей;
- 4) Формирование компонентов внешних границ у производных концептов первого уровня вложенности с учётом их рассмотрения в качестве самостоятельных корневых концептов.

Таблица 1 – Бинарные темпоральные отношения между частными концептами TD

Интерпретация названий отношений	Графическая иллюстрация	Соотношения между границами интервалов	Обозначение
TD_1 раньше TD_2		$T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^+$;	V_1
TD_1 встречается TD_2		$T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ = T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^+$;	V_2
TD_1 перекрывает TD_2		$T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^+$;	V_3
TD_1 начинает TD_2		$T_{TD_1}^- > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^+$;	V_4
TD_1 в течение TD_2		$T_{TD_1}^- = T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ < T_{TD_2}^+$;	V_5
TD_1 заканчивает TD_2		$T_{TD_1}^- > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ = T_{TD_2}^+$;	V_6
TD_1 равно TD_2		$T_{TD_1}^- = T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^- < T_{TD_2}^+, T_{TD_1}^+ > T_{TD_2}^-, T_{TD_1}^+ = T_{TD_2}^+$.	V_7

Введение этапности обусловлено, прежде всего, приоритетностью в определении отношений между концептуальными единицами TD .

1 этап. По результатам данного этапа структура концепта TD_0 определяется как $X_0 \rightarrow TP_0(H_0) \rightarrow Y_0$, где TP_0 и H_0 - ядро, имя которого является единым для технологий одной области знаний, и множество собственных характеристик соответственно, X_0 и Y_0 - множества предметных ориентаций и целевых установок унифицированного ядра каждой из технологий определённой отрасли производства соответственно.

Исходя из описанных ранее темпоральных аспектов, исходный корневой концепт TD_0 в дополнение будет определяться упорядоченной парой $(T_{TD_0}^-, T_{TD_0}^+)$, в которой $T_{TD_0}^-$ и $T_{TD_0}^+$ являются временными границами концепта TD_0 на относительной временной шкале.

2 этап. Этот этап ознаменован формированием отношения F между концептом TD_0 и концептами TD_α ($\alpha = \overline{1, k}; k \in N$) более частного характера, производных от него, в соответствии со следующими двумя постулатами:

- Представление каждого из полученных частных концептов TD_α идентично по структуре целостному концепту TD_0 , т.е. $X_{0,\alpha} \rightarrow TP_\alpha(H_\alpha) \rightarrow Y_{\alpha,0}$;
- Реализуемое разложение концепта TD_0 на концепты TD_α – единственно [24].

Итогом второго этапа для каждого из концептов TD_α , в части формирования их множеств исходных и результирующих компонентов $X_{0,\alpha}$ и $Y_{\alpha,0}$ соответственно, является следующее их структурное представление: $X_{0,\alpha(TD_0)} \rightarrow TP_\alpha(H_\alpha) \rightarrow Y_{\alpha,0(TD_0)}$, где TP_α и H_α - множества ядер и собственных характеристик каждого из частных концептов соответственно, $X_{0,\alpha(TD_0)}$ и $Y_{\alpha,0(TD_0)}$ - множества предметных ориентаций и целевых установок любого из концептов TD_α , унаследованных от множеств X_0 и Y_0 концепта TD_0 соответственно.

Обращаясь к временному аспекту данного этапа, стоит отметить, что при относительном типе шкал эмпирический переход от интервала $(T_{TD_0}^-, T_{TD_0}^+)$ концепта TD_0 к фиксированным интервалам $(T_{TD_\alpha}^-, T_{TD_\alpha}^+)$ каждого из концептов TD_α , может быть осуществлён в соответствии с выражением [25]: $(T_{TD_0}^-, T_{TD_0}^+) = A \cdot (T_{TD_\alpha}^-, T_{TD_\alpha}^+)$, где A - любое положительное число. Тем самым, данное выражение будет обосновывать отношение, обозначим его как G , определяющее функциональное соотношение между временным интервалом целостного концепта и временными интервалами частных концептов, производных от него. Таким образом, на втором этапе отношению F ставится в соответствие отношение G в качестве темпоральной пары.

3 этап. Реализация данного этапа связана с выявлением приоритетности в установлении отношений P_1 и P_2 у частных концептов TD_α , у которых, в свою очередь, совокупные множества исходных и результирующих компонентов $X_{0,\alpha}$ и $Y_{\alpha,0}$, помимо компонентов множеств $X_{0,\alpha(TD_0)}$ и $Y_{\alpha,0(TD_0)}$, содержат, в том числе, и множества $X_{0,\alpha(TD_\alpha)}$ и $Y_{\alpha,0(TD_\alpha)}$ соответственно, определяющих взаимосвязи концептов TD_α между собой. Иначе говоря, структурное представление обсуждаемых концептуальных единиц на данном этапе принимает следующий вид: $X_{0,\alpha(TD_\alpha)} \cup X_{0,\alpha(TD_0)} \rightarrow TP_\alpha(H_\alpha) \rightarrow Y_{\alpha,0(TD_0)} \cup Y_{\alpha,0(TD_\alpha)}$.

К примеру, если для концептов TD_j и TD_{j-1} , причём $j \in [1; k]$, справедливо, что $X_{0,j(TD_j)} \subseteq Y_{j-1,0(TD_{j-1})}$, то данное выражение обосновывает отношение P_1 между концептом TD_j и концептом TD_{j-1} .

Понятно, что темпоральной парой для отношения P_1 , в части определения взаимосвязей между концептами TD_j и TD_{j-1} , могут быть исключительно отношения V_1 и V_2 . Это связано с неотъемлемым фактом вырождения объекта (полуфабриката) материальной природы между временными интервалами $(T_{TD_{j-1}}^-, T_{TD_{j-1}}^+)$ и $(T_{TD_j}^-, T_{TD_j}^+)$, наличие которого и обуславливает причинно-следственность связи между концептами TD_j и TD_{j-1} .

В случае если допустить, что для концептов $TD_j, TD_{j-1}, TD_{j-2}, TD_{j-3}$, где $j \in [1; k]$, выполняются следующие соотношения: $X_{0,j-2(TD_{j-2})} \subseteq Y_{j-3,0(TD_{j-3})}$, $X_{0,j-1(TD_{j-1})} \subseteq Y_{j-3,0(TD_{j-3})}$, $X_{0,j-2(TD_{j-2})} \cap Y_{j-1,0(TD_{j-1})} = \emptyset$, $X_{0,j-1(TD_{j-1})} \cap Y_{j-2,0(TD_{j-2})} = \emptyset$, то данные выражения будут указывать на то обстоятельство, что концепты TD_{j-1} и TD_{j-2} находятся в отношении P_2 , а каждая из пар концептов $TD_{j-2} - TD_{j-3}$ и $TD_{j-1} - TD_{j-3}$ в отношении P_1 соответственно. Однако, если по логике протекания самой технологии попытаться определить отношение P_1 для каждой из пар концептов $TD_j - TD_{j-1}$ и $TD_j - TD_{j-2}$, то наступает явное противоречие, в части соответствия по отдельности множеств $Y_{j-1,0(TD_{j-1})}$ и $Y_{j-2,0(TD_{j-2})}$ множеству $X_{0,j(TD_j)}$. Дело в том, что исходными компонентами множества $X_{0,j(TD_j)}$ концепта TD_j должны являться компоненты совместной деятельности концептов TD_{j-1} и TD_{j-2} , а множества их конечных компонентов $Y_{j-1,0(TD_{j-1})}$ и $Y_{j-2,0(TD_{j-2})}$ могут содержать сугубо свои собственные (частные) результаты. Тем самым, возникают характеристические признаки определения отношения F между своеобразным обобщающим концептом для пары концептов $TD_{j-1} - TD_{j-2}$ и с каждым из них в отдельности. Другими словами, у структур концептов, находящихся между собой в отношении P_2 , иерархический статус будет менее приоритетным, что отражается в определении для них дополнительной степени вложенности, по сравнению с концептами, связанными отношением P_1 .

Обращаясь к темпоральной паре отношения P_2 , в аспекте определения взаимосвязей между концептами TD_{j-1} и TD_{j-2} , отметим, что ею могут быть по отдельности только отношения V_3, V_4, V_5, V_6, V_7 . Это легко объяснимо, поскольку результат совместной деятельности подобных концептов может быть определён только при условии наличия общих событийных моментов времени на соответствующих им временных интервалах. Как следствие, из последнего утверждения вытекает и положение о невозможности применения для отношения P_2 отношений V_1 и V_2 в качестве темпоральных пар. Если даже допустить противное, то данный факт свидетельствовал бы о некоторой альтернативе в вопросе получения результирующих компонентов обобщающего концепта для пары концептов $TD_{j-1} - TD_{j-2}$, находя-

щихся в отношении P_2 , что противоречит логики протекания самой технологии, в части предъявляемых требований для множества $X_{0,j(TD_j)}$ концепта TD_j .

4 этап. По итогам этого этапа структура каждого из концептов TD_α определяется как $X_{0,\alpha}^* \cup X_{0,\alpha(TD_\alpha)} \cup X_{0,\alpha(TD_0)} \rightarrow TP_\alpha(H_\alpha) \rightarrow Y_{\alpha,0(TD_0)} \cup Y_{\alpha,0(TD_\alpha)}$, в которой, по сравнению с предыдущим этапом, появляется $X_{0,\alpha}^*$. Это множества, так называемых, интегральных входных компонентов, предназначенных для пополнения множеств $X_{0,\alpha}$ дополнительными компонентами (оборудованием, инструментами, приспособлениями и т.п.), которые, в свою очередь, могут быть упорядочены в соответствии с методом [26]. Их появление обусловлено рассмотрением каждого из концептов TD_α в качестве самостоятельных концептуальных единиц. При этой ситуации могут потребоваться некоторые компоненты, не фигурировавшие нигде ранее, и, по сути, представляющие собой условие окончательной настройки предметной ориентации, которая, в свою очередь, влияет на итоговую реализацию целевой установки уже у новых самостоятельных концептуальных единиц из множества TD_α .

Рассмотрение темпоральной стороны для каждого из концептов TD_α на данном этапе связано с определением соответствующих упорядоченных пар $(T_{TD_\alpha}^-, T_{TD_\alpha}^+)$, в которых $T_{TD_\alpha}^-$ и $T_{TD_\alpha}^+$ являются временными границами концептов TD_α на относительной временной шкале во временных единицах, зафиксированных для каждого из них на втором этапе.

В дальнейшем процедура построения онтологий TD приобретает циклический характер, в части формирования декомпозиционных конструкций описания технологий по принципу «матрёшки».

Прикладной аспект модернизированного механизма построения онтологий TD может быть продемонстрирован на примере сконфигурированного фрагмента онтологического представления технологии сборки сандалий [27]. Иллюстрация данного фрагмента онтологии описывает двухуровневую декомпозиционную структуру обсуждаемой технологии, которая образована разложением целостного исходного концепта TD_0 , определяемого кортежем $\langle TP_0, X_0, Y_0, H_0 \rangle$ и временным интервалом $(T_{TD_0}^-, T_{TD_0}^+)$, на частные концепты $TD_1 - \dots - TD_9$, а также расщеплением концепта TD_3 , определяемого также $\langle TP_3, X_{03}, Y_{30}, H_3 \rangle$ и $(T_{TD_3}^-, T_{TD_3}^+)$, на концепты $TD_{31} - TD_{32}$, которые определяются кортежами $\langle TP_{31}, X_{031}, Y_{310}, H_{31} \rangle - \langle TP_{32}, X_{032}, Y_{320}, H_{32} \rangle$ и временными интервалами $(T_{TD_{31}}^-, T_{TD_{31}}^+) - (T_{TD_{32}}^-, T_{TD_{32}}^+)$ соответственно (рис. 1). Связи между концептами образованы наборами пар пространственно-временных отношений, определённых ранее и характерных для онтологического описания данной технологии, в частности $(F;G)$, $(P_1;V_1)$, $(P_2;V_7)$. Для каждого из обозначенных временных интервалов указаны коэффициенты перехода между ними при проведении декомпозиции соответствующих целостных концептов (для первой степени вложенности частных концептов – A_1 , для второй – A_2).

Таким образом, обобщённая модель онтологической системы представления технологических знаний сводится к кортежу следующего вида:

$$Ont_{tech} = \langle Ont_{decomp}, Ont_{temp} \rangle, \quad (2)$$

где Ont_{decomp} – онтология, которая отвечает за формирование декомпозиционных конструкций описания технологий, образуемых путём разложения целостных концептов на частные концепты, а также за определение причинно-следственных отношений между полученными частными концептами;

Ont_{temp} – онтология, которая отвечает за фиксацию переходных зависимостей между временными интервалами целостных и частных концептов, а также за определение бинарных темпоральных отношений между границами временных интервалов вырожденных частных концептов.

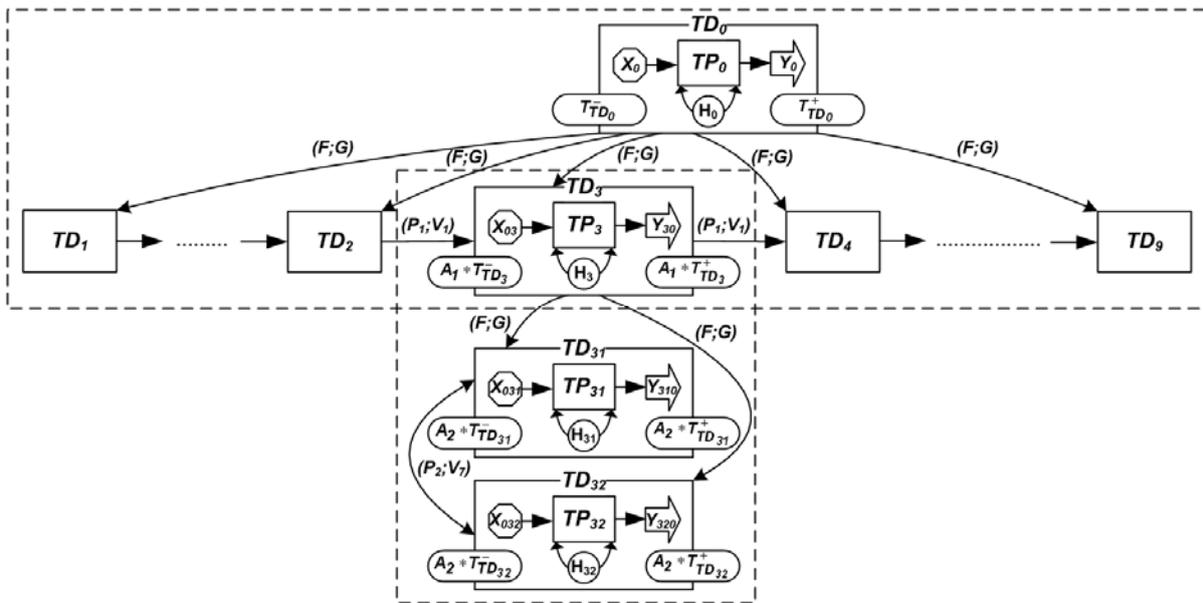


Рисунок 1 – Фрагмент онтологического представления технологии сборки сандалий

ВЫВОДЫ

1) Представленный аналитический обзор ключевых подходов к формализованному описанию технологических процессов свидетельствует о высокой степени актуальности предмета данного исследования, что выражается в постоянном совершенствовании подходов к представлению технологических знаний.

2) Предложенная обобщённая модель онтологической системы представления знаний о технологиях позволяет формализовать отображение логики процессов их протекания и реализации с позиций пространственно-временных аспектов, что определяет новизну концептуальных взглядов автора, как на предмет, так и на объект исследования в целом.

3) Алгоритмическая направленность процедуры построения онтологий TD , с учётом их темпоральных особенностей, создаёт предпосылки для успешного проектирования автоматизированных систем накопления технологических знаний нового поколения. Практическая значимость от их программно-аппаратной реализации, в первую очередь, позволит решить ряд проблем, возникающих при переходах «конструктор-технолог» или «технолог-конструктор» в условиях отдельно взятых промышленных производств, поскольку связующим их звеном является наиболее удачная с позиций уровня формализации модель представления технологических знаний, понятная для широкого круга специалистов различных предметных областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производственные технологии / под ред. В. В. Садовского [и др.]. Минск: БГЭУ, 2008. 431 с.
2. Большой российский энциклопедический словарь / под. ред. А.Е. Махова [и др.]. М.: Дрофа, 2009. 1887 с.
3. Андреев, Д.А. Способы формализованного описания технологий: попытка обзора / Д.А. Андреев // Труды Псковского политехнического института. Сер. Машиностроение. Электротехника. 2011. № 15.3. – С. 291–297.
4. Горнев В.Ф. К технологиям машиностроительных производств XXI-го века // и-Маш: Ресурс машиностроения. Режим доступа: http://www.i-mash.ru/materials/economy/55-k_tekhnologijam_mashinostroitelnykh_proivodstv_xxi.html (дата обращения 25.10.2012).
5. Рейнгольд, Л.А. Использование формализованного языка для структурного анализа технологических процессов / Л.А. Рейнгольд // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1986. № 2. – С. 13–14.
6. Черемных, С.В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С.В. Черемных, И.О. Семёнов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 208 с.
7. Основы онтологии / под ред. Ф. Ф. Вякерева [и др.]. СПб.: СПбГУ, 1997. 280 с.
8. Дацюк С.А. Онтологизации // XYZ: Сетевой проектный журнал. Режим доступа: <http://xyz.org.ua/o.html> (дата обращения 25.10.2012).

9. Евгеньев Г.Б. Разработка интеллектуальных САПР технологических процессов / Г.Б. Евгеньев, Б.В. Кузьмин, А.А. Кокорев // Научная сессия МИФИ–2004: Сборник научных трудов. Москва, 2004. Т. 3. – С. 43–44.
10. Кобозева, И.М. Онтология силовых процессов / И.М. Кобозева, А.С. Марушкина // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: Сборник трудов международной конференции «Диалог-2010». Москва, 2010. Вып. 9(16). – С. 192–199.
11. Палагин, А.В. Модель категориального уровня языково-онтологической картины мира / А.В. Палагин, Н.Г. Петренко // Математические машины и системы. 2006. № 3. – С. 91–104.
12. Троицкий, В.В. Методы и программные средства представления временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 240 с.
13. Шиян, Т.А. Формальная онтология материальных процессов и моделирование глобальных биосоциальных образований / Т.А. Шиян // Математическое моделирование социальных процессов. Москва, 2004. Вып. 6. Режим доступа: taras-shiyan.narod.ru/my_tamosp/shiyan_tamosp_6.pdf (дата обращения 25.10.2012).
14. Кеберле, Н.Г. Моделирование динамических предметных областей в онтологиях / Н.Г. Кеберле // Сборник научных работ Харьковского университета воздушных сил. 2009. Вып. 3(21). – С. 121–127.
15. Курган, А.А. Формирование феноменологической онтологии времени и её основные принципы / А.А. Курган // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 334. – С. 32–34.
16. Гуц, А.К. Математическая логика и теория алгоритмов / А.К. Гуц. – Омск: Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 108 с.
17. Андреев, Д.А. Метод онтологического моделирования предметных областей технологических знаний / Д.А. Андреев, М.В. Воронов // Математические методы в технике и технологии: Сборник трудов XXV международной научной конференции. Волгоград, 2012. Т. 5. – С. 35–36.
18. Андреев, Д.А. Метод формализованного описания технологий / Д.А. Андреев, М.В. Воронов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1, Естественные и технические науки. 2011. № 2. – С. 47–51.
19. Мальцева, С.В. Применение онтологических моделей для решения задач идентификации и мониторинга предметных областей / С.В. Мальцева // Бизнес-информатика. 2008. № 3. – С. 18–24.
20. Белов, С.В. Шкалы в системах мягких измерений / С.В. Белов // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов II международной конференции. Санкт-Петербург, 1999. Т. 1. – С. 81–84.
21. Allen J.F. Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. No. 11. P. 832–843.
22. Черкашин, Б.Н. Концепции современного естествознания / Б.Н. Черкашин. – Воронеж: ВИ-ЭСУ, 2009. – 450 с.
23. Андреев, Д.А. Процедурный механизм конструирования онтологических представлений декомпозиционных структур технологий / Д.А. Андреев, М.В. Воронов // Интернет и современное общество: Сборник тезисов докладов XV Всероссийской объединённой конференции. Санкт-Петербург, 2012. – С. 37–40.
24. Воронов, М.В. Система формализации технологических знаний / М.В. Воронов // Моделирование и анализ данных. 2009. Вып. 4. – С. 4–18.
25. Загоруйко, Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г. Загоруйко. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 270 с.
26. Андреев, Д.А. Системно-онтологический подход к машинному описанию компонентной среды технологических процессов / Д.А. Андреев, И.В. Антонов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 9. – С. 29–34.
27. Шагапова, И.М. Технология сборки заготовок обуви / И.М. Шагапова. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 184 с.

Андреев Дмитрий Анатольевич

ФГБОУ ВПО «Псковский государственный университет», г. Псков

Старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии»

E-mail: dandreev60@mail.ru

D.A. ANDREEV

MODELING TEMPORAL RELATIONS IN ONTOLOGIES OF TECHNOLOGICAL ACTIONS

The analytical review of key approaches to the formalized description of technological processes is presented. The model of ontological representation of any technology at any stage of its decomposition is considered. Modernization of the procedural mechanism of creation of ontologies of technological actions, which is due based on their temporal features, is realized. The generalized model of ontological system of representation of technological knowledge is offered.

Keywords: *ontology; decomposing construction; technological action; time interval; temporal pair.*

BIBLIOGRAPHY

1. Proizvodstvennye tehnologii / pod red. V. V. Sadovskogo [i dr.]. Minsk: BGJeU, 2008. 431 s.
2. Bol'shoy rossijskij jenciklopedicheskiy slovar' / pod. red. A.E. Mahova [i dr.]. M.: Drofa, 2009. 1887 s.
3. Andreev, D.A. Sposoby formalizovannogo opisanija tehnologij: popytka obzora / D.A. Andreev // Trudy Pskovskogo politehnicheskogo instituta. Ser. Mashinostroenie. Jelektrotehnika. 2011. № 15.3. – S. 291–297.
4. Gornev V.F. K tehnologijam mashinostroitel'nyh proizvodstv XXI-go veka // i-Mash: Resurs mashinostroenija. Rezhim dostupa: http://www.i-mash.ru/materials/economy/55-k_tekhnologijam_mashino_stroitelnykh_proivodstv_xxi.html (data obrashhenija 25.10.2012).
5. Rejngol'd, L.A. Ispol'zovanie formalizovannogo jazyka dlja strukturnogo analiza tehnologicheskikh processov / L.A. Rejngol'd // Mehanizacija i jelektifikacija sel'skogo hozjajstva. 1986. № 2. – S. 13–14.
6. Cheremnyh, S.V. Strukturnyj analiz sistem: IDEF-tehnologii / S.V. Cheremnyh, I.O. Semjonov, V.S. Ruchkin. – M.: Finansy i statistika, 2003. – 208 s.
7. Osnovy ontologii / pod red. F. F. Vjakkereva [i dr.]. SPb.: SPbGU, 1997. 280 s.
8. Dacjuk S.A. Ontologizacii // XYZ: Setевой proektnyj zhurnal. Rezhim dostupa: <http://xyz.org.ua/o.html> (data obrashhenija 25.10.2012).
9. Evgenev G.B. Razrabotka intellektual'nyh SAPR tehnologicheskikh processov / G.B. Evgenev, B.V. Kuz'min, A.A. Kokorev // Nauchnaja sessija MIFI–2004: Sbornik nauchnyh trudov. Moskva, 2004. T. 3. – S. 43–44.
10. Kobozeva, I.M. Ontologija silovyh processov / I.M. Kobozeva, A.S. Marushkina // Komp'juternaja lingvistika i intellektual'nye tehnologii: Sbornik trudov mezhdunarodnoj konferencii «Dialog-2010». Moskva, 2010. Vyp. 9(16). – S. 192–199.
11. Palagin, A.V. Model' kategorial'nogo urovnja jazykovo-ontologicheskoy kartiny mira / A.V. Palagin, N.G. Petrenko // Matematicheskie mashiny i sistemy. 2006. № 3. – S. 91–104.
12. Troickij, V.V. Metody i programmnye sredstva predstavlenija vremennyh zavisimostej v intellektual'nyh sistemah podderzhki prinjatija reshenij: dis. ... kand. tehn. nauk. M., 2004. 240 s.
13. Shijan, T.A. Formal'naja ontologija material'nyh processov i modelirovanie global'nyh bio-social'nyh obrazovanij / T.A. Shijan // Matematicheskoe modelirovanie social'nyh processov. Moskva, 2004. Vyp. 6. Rezhim dostupa: taras-shijan.narod.ru/my_mamosp/shijan_mamosp_6.pdf (data obrashhenija 25.10.2012).
14. Keberle, N.G. Modelirovanie dinamicheskikh predmetnyh oblastej v ontologijah / N.G. Keberle // Sbornik nauchnyh rabot Har'kovskogo universiteta vozdušnyh sil. 2009. Vyp. 3(21). – S. 121–127.
15. Kurgan, A.A. Formirovanie fenomenologicheskoy ontologii vremeni i ejo osnovnye principy / A.A. Kurgan // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. № 334. – S. 32–34.
16. Guc, A.K. Matematicheskaja logika i teorija algoritmov / A.K. Guc. – Omsk: Nasledie. Dialog-Sibir', 2003. – 108 s.
17. Andreev, D.A. Metod ontologicheskogo modelirovanija predmetnyh oblastej tehnologicheskikh znaniy / D.A. Andreev, M.V. Voronov // Matematicheskie metody v tehnike i tehnologij: Sbornik trudov XXV mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Volgograd, 2012. T. 5. – C. 35–36.
18. Andreev, D.A. Metod formalizovannogo opisanija tehnologij / D.A. Andreev, M.V. Voronov // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tehnologij i dizajna. Ser. 1, Estestvennye i tehnicheskie nauki. 2011. № 2. – S. 47–51.
19. Mal'ceva, S.V. Primenenie ontologicheskikh modelej dlja reshenija zadach identifikacii i monitornogo nadzora predmetnyh oblastej / S.V. Mal'ceva // Biznes-informatika. 2008. № 3. – S. 18–24.
20. Belov, S.V. Shkaly v sistemah mjagkih izmerenij / S.V. Belov // Mjagkie vychislenija i izmerenija: Sbornik dokladov II mezhdunarodnoj konferencii. Sankt-Peterburg, 1999. T. 1. – S. 81–84.
21. Allen J.F. Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. No. 11. P. 832–843.
22. Cherkashin, B.N. Konceptcii sovremennogo estestvoznaniya / B.N. Cherkashin. – Voronezh: VI-JeSU, 2009. – 450 s.
23. Andreev, D.A. Procedurnyj mehanizm konstruirovaniya ontologicheskikh predstavlenij dekompozicionnyh struktur tehnologij / D.A. Andreev, M.V. Voronov // Internet i sovremennoe obshhestvo: Sbornik tezisov dokladov XV Vserossijskoj ob#edinjonnoj konferencii. Sankt-Peterburg, 2012. – C. 37–40.
24. Voronov, M.V. Sistema formalizacii tehnologicheskikh znaniy / M.V. Voronov // Modelirovanie i analiz dannyh. 2009. Vyp. 4. – S. 4–18.
25. Zagorujko, N.G. Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy / N.G. Zagorujko. – Novosibirsk: IM SO RAN, 1999. 270 s.
26. Andreev, D.A. Sistemno-ontologicheskij podhod k mashinnomu opisaniju komponentnoj sredy tehnologicheskikh processov / D.A. Andreev, I.V. Antonov // Promyshlennye ASU i kontrolyery. 2012. № 9. – S. 29–34.
27. Shagapova, I.M. Tehnologija sborki zagotovok obuvi / I.M. Shagapova. – M.: Ljogkaja i pishhevaja promyshlennost', 1983. – 184 s.

Andreev Dmitry Anatoljevich

Pskov state university, Pskov

The senior teacher of faculty «Information systems and technologies»

E-mail: dandreev60@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.95

А.Ю. АЛБАГАЧИЕВ, А.В. МИХЕЕВ

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований по разработанному методу регистрации быстропротекающих тепловых процессов при сверлении. Экспериментальные данные обработаны с использованием регрессионного моделирования. Предложена математическая модель теплообразования.

Ключевые слова: эксперимент; сверление; тепловой процесс; регрессионное моделирование; теплообразование.

Для исследования зависимости распределения и динамики изменения температур при сверлении от подачи и скорости вращения применён метод сверления горячих спаев хромель-копелевых термопар. Диаметр сверл ($D=0,5\text{мм}$) выбирался меньше диаметра рабочей области термопары ($D=3\text{мм}$) для того, чтобы продолжать получать данные после того как термопара будет просверлена, в отличие от метода с перерезаемой термопарой. Измерение распределения температур по глубине отверстия производилось двумя склеенными термопарами, просверливаемыми последовательно. Толщина каждой термопары – $0,5\text{мм}$. Слой клея обеспечивал электрическую изоляцию термопар (рис. 1).

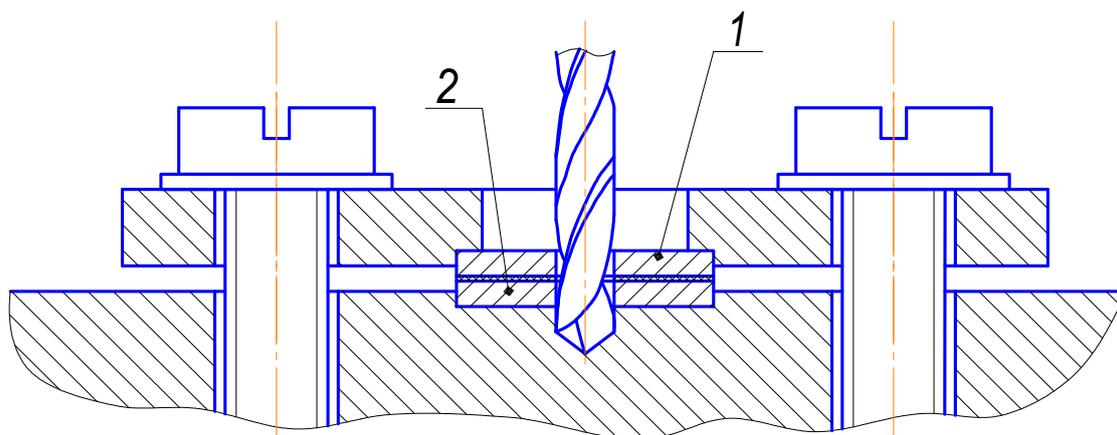


Рисунок 1 – Измерение температуры при сверлении

Регистрация и запись сигналов с термопар осуществлялась при помощи системы сбора данных состоящей из двух идентичных инструментальных усилителей, согласующего устройства SCB-68 и 16 разрядного аналого-цифрового преобразователя NIPCI-6221, подключённого к персональному компьютеру (рис. 2).

Обработка (компенсация статических погрешностей, фильтрация) и анализ данных производились с применением программного обеспечения LabVIEW 8.5. Статическая и динамическая калибровка измерительной системы произведена по двум точкам: кипение воды 100°C и кристаллизация олова 239°C . В результате определена ($0,015\text{ В}/^\circ\text{C}$) и тепловая инерционность ($0,005\text{ сек.}/^\circ\text{C}$) системы. Сверление выполнялось на настольном фрезерном станке с ЧПУ Kosy-2.

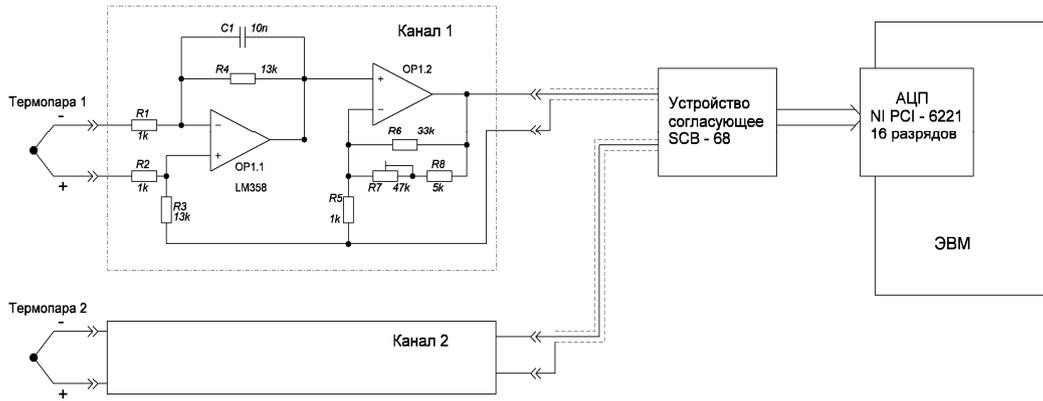


Рисунок 2 - Система сбора данных

Для составления модели температурного режима был составлен ортогональный центральный композиционный план второго порядка, который предусматривает проведение девяти опытов при трёх уровнях каждого фактора (табл. 1).

Таблица 1 – уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни			Интервалы варьирования
	+1	0	-1	
X _{1H} – частота вращения n, об/мин	10000	7500	5000	5000
X _{2H} – подача s, мм/мин.	0,3	0,2	0,1	0,2

Измеряемые величины: Y₁ – максимальная температура θ, °C; Y₂ – время нарастания температуры t_{max}, сек.

При расчёте коэффициентов уравнения регрессии применяются кодированные значения факторов, которые связаны с натуральными выражением:

$$X = \frac{X_H - X_{cp}}{\Delta X} \tag{1}$$

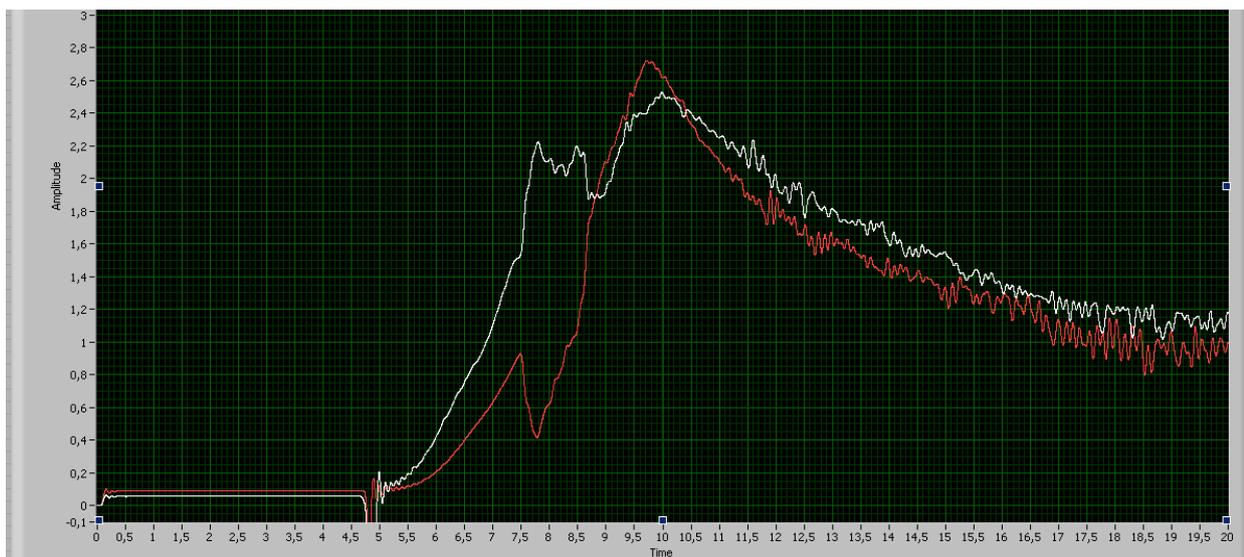
где X_{cp} – среднее значение фактора X; ΔX – интервал варьирования фактора X.

Матрица планирования и результаты опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – условия и результаты опытов

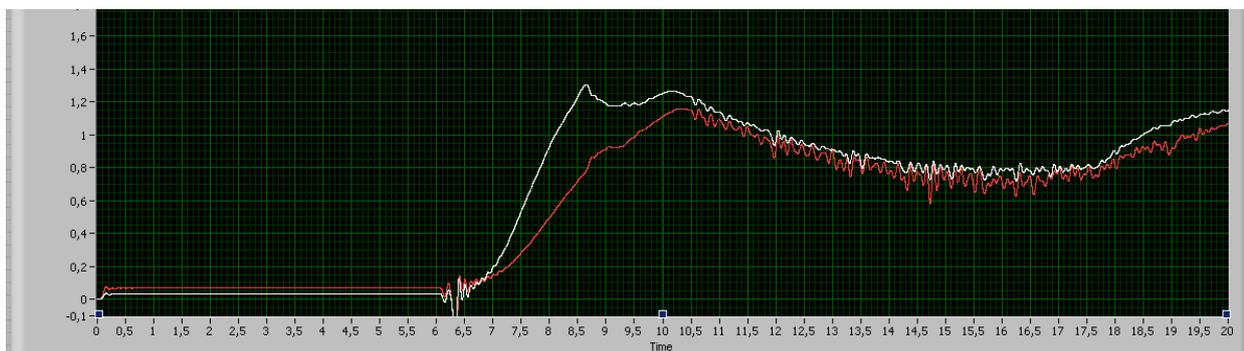
№	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ ×X ₂	X ₁ ² - 2/3	X ₂ ² - 2/3	Y ₁	Y ₂
1	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	166	2,25
2	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	172,6	2,25
3	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	226	3,4
4	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	146	4,5
5	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	240	3,25
6	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	112,6	2
7	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	169	2,25
8	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	186	4
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	176,4	2,6

Графики изменения температуры для различных режимов резания приведены на рисунках 4 и 5.



*Рисунок 4 – Сверление при $n = 10000$ об/мин, $s = 0,1$ мм/мин.
Белая линия – термопара 1, красная линия – термопара 2*

На рисунке 4 показано, что при резком возрастании температуры термопары 1 (на отметке времени 7,5), вызванном переходом от врезания к сверлению полным диаметром сверла, происходит уменьшение интенсивности нагрева второй термопары вследствие увеличения доли тепла, уносимого стружкой. На отметке времени 8,6 происходит завершение сверления первой термопары и переход ко второй, где и достигается максимум температуры.



*Рисунок 5 - Сверление при $n = 5000$ об/мин, $s = 0,2$ мм/мин. Белая линия – термопара 1,
красная линия – термопара 2*

Из данных графика на рисунке 5 можно заключить, что при низкой частоте вращения и высокой подаче основное тепловыделение происходит в слоях, близких к поверхности из-за того, что тепло от второй термопары успевает отводиться через нижнюю плоскость к держателю.

Коэффициенты уравнения регрессии (кроме b_0) определяются по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} \quad (2)$$

где i – номер столбца матрицы;

j – номер опыта;

x_{ij} – элемент соответствующего столбца матрицы,

y_i – значение выходного параметра в i опыте.

Коэффициент b_0 определяется по формуле:

$$b_0 = b'_0 - \beta \sum_{i=1}^N b_{ii} \quad (3)$$

где b'_0 – значение, полученное по формуле 2; β – коэффициент числа степеней свободы (для плана второго порядка функции двух переменных $\beta=2/3$); b_{ii} – коэффициенты, найденные для переменных, возведённых в квадрат.

Найденные по формулам 2 и 3 коэффициенты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты уравнений регрессии

Выходные параметры	Коэффициенты уравнений регрессии						
	b'_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_0
Y_1	177,18	33,47	-8,4	-21,65	0.022	0.422	176,8
Y_2	2.944	0.025	-0.858	-0.6	-0.008	0.492	2.62

Полученные уравнения регрессии:

$$Y_1 = 88.2 + 16.733X_1 - 4.2X_2 - 10.825X_1 \cdot X_2 + 0.03X_1^2 + 0.633X_2^2$$

$$Y_2 = 2.62 + 0.025X_1 - 0.858X_2 - 0.6X_1 \cdot X_2 - 0.008X_1^2 + 0.492X_2^2$$

При переходе обратно к натуральным значениям факторов получают уравнения модели тепловыделения при сверлении:

$$\theta = 51.764 + 0.0055n + 53.857S - 0.11n \cdot S + 15.825S^2$$

$$t_{\max} = 3.09 + 0.012n - 4.71S - 0.0006n \cdot S + 12.3S^2 \quad (4)$$

Коэффициенты при n^2 в обоих уравнениях менее 10^{-8} .

Адекватность полученных моделей оценивается с помощью критерия Фишера (сравнения расчетного и табличного значений):

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_{табл.} \quad (5)$$

где S_{ad}^2 - дисперсия адекватности; S_y^2 - дисперсия параметра оптимизации.

Для определения дисперсии параметров оптимизации дополнительно к 9 основным были проведены 4 дополнительных опыта по сверлению одной термопары с режимами резания $n = 10000$ об/мин, $s = 0,1$ мм/мин. По результатам дополнительных измерений вычислены дисперсии воспроизводимости: $S_{y1}^2 = 192.3$ и $S_{y2}^2 = 0.0756$.

Дисперсия адекватности вычисляется по выражению:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum (\hat{y} - y_j)^2}{f_2} \quad (6)$$

где f_2 – Число степеней свободы модели ($f_2 = 4$).

Вычисленные дисперсии адекватности: $S_{ad1}^2 = 685$; $S_{ad2}^2 = 6.62$.

Расчётные критерии Фишера: $F_{p1} = \frac{685}{192.3} = 3.57$; $F_{p2} = \frac{6.621}{1.036} = 6.39$ меньше таблич-

ного значения для уровня значимости $\alpha = 0.05$: $F_{табл.} = 9.1$, следовательно, оба уравнения модели адекватны.

При резании металлов образование стружки происходит по методу последовательного сдвига слоёв материала. Процесс сдвига вносит основной вклад в теплообразование. Генерация и распространение тепла при сдвиге описываются дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (7)$$

с начальным условием $\theta = 0$ при $t = 0$ и граничным условием:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{PV}{A} \quad (8)$$

$\theta = 0$ при $z \rightarrow \infty$

где P – сила резания при образовании трещины, [Н];

V – скорость резания, $V = 2\pi r n / 60 * 1000$ [м/с];

a – температуропроводность, [м²/с];

A – поперечное сечение срезаемой стружки [м²];

z – расстояние от места сверления, [м].

Температура при сдвиге в зависимости от времени (t) определяется решением уравнения (7), которое приведено в работах [5] и [8]:

$$\theta = \frac{PV\sqrt{a}}{\sqrt{\pi A \lambda}} \sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \quad (9)$$

Площадь сечения стружки определяется как:

$$A [\text{м}^2] = \frac{sR}{n} 0.6 \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

где s – подача, мм/сек;

n – частота вращения, об/мин;

R – радиус сверла, мм.

Сила сдвига перемычки P рассчитывается по формуле приведённой Воронцовым А.Л.:

$$P = 0.5 \beta \sigma_s h_1 \left(1 - e^{-\frac{e_p}{2.31}}\right) \frac{k_c - \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (11)$$

где β – коэффициент Лоде;

σ_s – условный предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

h_1 – толщина срезаемого слоя;

e_p – деформация разрушения;

k_c – коэффициент усадки стружки;

γ – передний угол инструмента.

При сверлении толщину срезаемого слоя можно определить по выражению:

$$h_1 [\text{м}] = \frac{A}{R} = 0.06 \frac{a}{n} \quad (12)$$

У спиральных сверл передний угол γ изменяется по длине режущей кромки и зависит от угла наклона винтовой канавки ω и угла в плане ϕ . Передний угол γ в данной точке x в нормальном сечении к режущей кромке, определяется по формуле, выведенной П.Р. Родиныным [7]:

$$\text{tg}(\gamma) = \frac{r_x}{R} \text{tg}(\omega) \frac{(1 - \sin^2(\mu_x) \sin^2(\phi))}{\sin(\phi) \cos(\mu_x)} - \cos(\phi) \text{tg}(\mu_x) \quad (13)$$

где r_x – расстояние от оси сверла; R – наружный радиус

μ_x – угол между радиусом r_x и проекцией режущей кромки $\sin \mu_x = a_n / r$

a_n – ширина перемычки (для стандартной заточки $a_n = 0.15 * R$)

У стандартных сверл из быстрорежущей стали $\omega = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$, $\sin \mu_x = 0.15 R / r$.

Коэффициент усадки стружки в зависимости от переднего угла может быть вычислен по формуле из работы [5]:

$$k_c = u \cos^2(\gamma) \left\{ 2\mu(1 - \text{tg}(\mu)) + \sqrt{[2\mu(1 - \text{tg}(\mu))]^2 + \left[\frac{4\mu}{u \cos(\gamma)} + 1 - 2\mu\right] \frac{1}{\cos^2(\gamma)}} \right\} \quad (14)$$

где μ – коэффициент трения материалов инструмента и заготовки;

u – коэффициент распространения деформации

$$\begin{cases} u = 1 & \text{при } \gamma \geq 0; \\ u = 1 - \sin \gamma & \text{при } \gamma < 0. \end{cases} \quad (15)$$

После подстановки выражений (8), (9) и (10) в формулу (7):

$$\theta = 0.03 \frac{n\beta\sigma_s \sqrt{a}}{\lambda} \left(1 - e^{-\frac{e_p}{2.31}} \right) \frac{r_x k_c - \sin \gamma}{R \cos \gamma} \sqrt{t} e^{-\frac{z^2}{4at}} \quad (16)$$

Вычисленные значения переднего угла, коэффициента усадки стружки и их соотношения из формулы k_θ (12) на различных расстояниях от центра сверла (l) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения переднего угла, коэффициента усадки стружки и их соотношения

$l = r_x/R$	γ_x	k_c	$\frac{k_c - \sin(\gamma)}{\cos(\gamma)}$	$k_\theta = \frac{r_x k_c - \sin(\gamma)}{R \cos(\gamma)}$
1	30.47°	1.09	0.677	0.68
0.8	23.4°	1.38	1.07	0.86
0.6	14.8°	1.82	1.62	0.97
0.4	3.15°	2.54	2.5	1
0.2	-24.15°	3.01	3.8	0.75
0.16	-33.1°	2.27	4.9	0.8

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что максимальная температура будет наблюдаться на расстоянии $0,4r$ от центра сверла.

Изменение k_θ можно приближенно (до 2 знака) описать квадратичной зависимостью:

$$k_\theta = -l^2 + l + 0.75$$

Это приближение позволяет упростить расчёт распределения температуры по длине режущих кромок.

Для расчета температуры при сверлении применяется действующее значение коэффициента k_θ , которое находится численным интегрированием по длине режущей кромки:

$$\int_0^1 k_\theta dl = 0.78.$$

С учетом действующего значения k_θ выражение (14) принимает вид:

$$\theta = 0.023 \frac{n\beta\sigma_s \sqrt{a}}{\lambda} \left(1 - e^{-\frac{e_p}{2.31}} \right) \sqrt{t} e^{-\frac{z^2}{4at}} \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет рассчитать изменение во времени температурных полей в объёме заготовки.

Значения температуры рассчитанные для режимов резания задававшихся в экспериментах согласуются с результатами экспериментов и регрессионными зависимостями для t_{\max} . Сформулированные модели позволяют подобрать оптимальные с точки зрения производительности обработки и стойкости инструмента режимы сверления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981
2. Грановский, Г.И. Резание материалов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Даниелян, А.М. Теплота и износ инструмента при резании металлов / А.М. Даниелян. – М.: Машгиз, 1954. – 276 с.
4. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологического процесса / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981.
5. Воронцов А.П., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Вестник машиностроения 2008г. №5, стр. 61-69.
6. Виноградов, В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев. – М. Машиностроение, 1982.

7. Родин, П.Р. Металлорежущие инструменты / П.Р. Родин. – Киев : Высшая школа, 1974. – 400 с.
8. Бальков, А.В. Алмазное сверление отверстий / А.В. Бальков. – М.: Наука и технологии, 2003.
9. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат.

Албагачиев Али Юсупович

Доктор технических наук, профессор,
Московский государственный университет приборостроения и информатики
Институт машиноведения РАН

Михеев Александр Владимирович

Аспирант
Московский государственный университет приборостроения и информатики

A.Yu. ALBAGACHIEV, A.V.MIKHEEV

STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION WHEN DRILLING

This paper presents an experimental results on the developed method of recording rapid thermal processes during drilling. The experimental data were processed using regression modeling. Was developed the mathematic model of thermal processes during drilling.

Keywords: *experiment; drilling; thermal process; regression model; heat release.*

BIBLIOGRAPHY

1. Reznikov, A.N. Teplofizika processov mehanicheskoy obrabotki / A.N. Reznikov. – М.: Mashinostroenie, 1981
2. Granovskij, G.I. Rezanie materialov / G.I. Granovskij, V.G. Granovskij. – М.: Vysshaja shkola, 1985. - 304 s.
3. Danieljan, A.M. Teplota i iznos instrumenta pri rezanii metallov / A.M. Danieljan. -М.: Mashgiz, 1954. - 276 s.
4. Spiridonov, A.A. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskogo processa / A.A. Spiridonov. – М.: Mashinostroenie, 1981.
5. Voroncov A.P., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Ju. Vestnik mashinostroenija 2008g. №5, str. 61-69.
6. Vinogradov, V.N. Iznashivanie pri udare / V.N. Vinogradov, G.M. Sorokin, A.Ju. Albagachiev. – М. Mashinostroenie, 1982.
7. Rodin, P.R. Metallorzhushhie instrumenty / P.R. Rodin. – Киев : Vysshaja shkola, 1974. – 400 s.
8. Balykov, A.V. Almaznoe sverlenie otverstij / A.V. Balykov. – М.: Nauka i tehnologii, 2003.
9. Gutnikov, V.S. Integral'naja jelektronika v izmeritel'nyh ustrojstvah / V.S. Gutnikov. – Л.: Jenergoatomizdat.

Albagachiyev Ali Yusupovich

Doctor of Technical Sciences, Professor
Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Institute of Engineering Science Russian Academy of Sciences

Mikheyev Aleksandr Vladimirovich

Postgraduate
Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science

С.И. ВДОВИН, К.С. ЛУНИН, Д.Н. МАЛЬЦЕВ

УТОНЕНИЕ СТЕНКИ ТРУБЫ ПРИ ГИБКЕ ПО КОПИРУ

Дана вариационная оценка утонения стенки трубы, изогнутой по круглому копиру без изменения формы поперечного сечения

Ключевые слова: пластическая деформация изгиба; изменение толщины стенки трубы.

Установившаяся стадия изгиба по копиру характеризуется непрерывным увеличением протяженности участка заготовки, изогнутого на окончательный радиус R_0 , и наличием зоны свободного (без контакта с инструментом) изгиба, которая перемещается по заготовке вслед за обкатывающим роликом и имеет стабильную длину. В названной зоне располагается переходный участок заготовки с изменяющимся от ∞ до R_0 радиусом оси, рисунок 1.

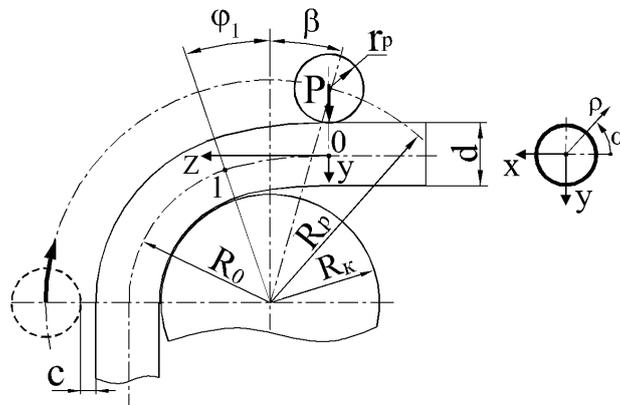


Рисунок 1 – Схема изгиба трубы обкатыванием по круглому копиру

Обкатывающий ролик перемещается по окружности радиуса R_p , средний радиус r сечений стенки трубы принят неизменным. Точками 0, 1 обозначены границы зоны свободного изгиба; ее длина, равная аппликате z_1 точки 1, находится в прямой зависимости от зазора c между заготовкой и роликом в его исходном положении.

Из функции напряжения текучести $\sigma_s = A\varepsilon_1^n$ выводятся формулы кривизны и угла поворота оси переходного участка заготовки [1]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad \varphi_1 = \frac{z_1}{R_0(m+1)}, \quad \text{где } m = 1/n.$$

В объеме V зоны свободного изгиба будет варьироваться работа внутренних сил U , которую содержит вариационное уравнение

$$\int_V \frac{\partial U}{\partial v_1} dV + \frac{\partial W}{\partial v_1} = 0, \quad (1)$$

где v_1 – варьируемый параметр.

Работа W внешней силы P , затрачиваемая на деформирование заготовки, равна произведению момента M в точке 1 на угол φ_1 , см. рисунок 1. Вариация работы $\delta W = \varphi_1 \delta M$, где

$$M = \int_F \sigma_z \rho \sin \alpha dF, \quad (2)$$

F – площадь сечения трубы с размерами, условно равными исходным.

В качестве варьируемого параметра v_1 принимаем коэффициент пропорциональности напряжений

$$\sigma_\alpha = \nu_1 \sigma_z. \quad (3)$$

Исходя из условия пластичности при $\sigma_p = 0$ и пренебрежимо малых касательных напряжениях, связываем σ_z с напряжением текучести σ_s :

$$\sigma_z = \frac{\pm \sigma_s}{\sqrt{1 - \nu_1 + \nu_1^2}}. \quad (4)$$

Вариацию работы внешней силы в уравнении (1) выражаем без учета упрочнения материала через производную момента (2):

$$\frac{\partial W}{\partial \nu_1} = \varphi_1 \frac{\partial \sigma_z}{\partial \nu_1} \int_F \rho \sin \alpha dF. \quad (5)$$

Интегрирование согласно (5) и подстановка производной выражения σ_z (4) дает приближенную формулу

$$\frac{\partial W}{\partial \nu_1} = \varphi_1 \frac{2\sigma_s r^2 t (1 - 2\nu_1)}{(1 - \nu_1 + \nu_1^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Деформации переходного участка заготовки записываем в цилиндрических координатах, основанием для использования прямолинейной осевой координаты z являются относительно небольшие (порядка 0,1) значения φ_1 .

Формулу деформации ε_z упрощаем к виду: $\varepsilon_z = \frac{\rho \sin \alpha}{R}$, игнорируя менее значимые компоненты. Используя принятое соотношение (3), а также уравнения связи, выводим формулы

$$\varepsilon_\rho = -\varepsilon_z \frac{1 + \nu_1}{2 - \nu_1}, \quad \varepsilon_\alpha = -\varepsilon_z \frac{1 - 2\nu_1}{2 - \nu_1}. \quad (7)$$

Интегрируем формулу ε_ρ с использованием граничного условия: $u_\rho = 0$ при $\rho = r, y = 0$ и выражаем радиальное перемещение [1]:

$$u_\rho = \frac{(r^2 - \rho^2) \sin \alpha}{2R} \cdot \frac{1 + \nu_1}{2 - \nu_1} - y \sin \alpha.$$

Из формул деформации ε_α и u_ρ выражаем $du_\alpha/d\alpha = \varepsilon_\alpha \rho - u_\rho$, отсюда

$$u_\alpha = \frac{\rho^2 \cos \alpha}{R} \cdot \frac{1 - 2\nu_1}{2 - \nu_1} + \frac{\cos \alpha}{2R} (r^2 - \rho^2) \cdot \frac{1 + \nu_1}{2 - \nu_1} - y \cos \alpha.$$

Интеграл по z деформации ε_z с учетом формулы кривизны оси $1/R$ определяет перемещение

$$u_z = \frac{\rho \sin \alpha}{(m + 1)R_0 z_1^m} z^{m+1}.$$

Дифференцируя полученные выражения перемещений по цилиндрическим координатам [1], выражаем деформации сдвига

$$\gamma_{\rho\alpha} = \frac{-\rho \cos \alpha}{R} \cdot \frac{3\nu_1}{2 - \nu_1},$$

$$\gamma_{\alpha z} = \frac{mz^{m-1}}{R_0 z_1^m} \left(\rho^2 \cdot \frac{1 - 2\nu_1}{2 - \nu_1} + \frac{r^2 - \rho^2}{2} \cdot \frac{1 + \nu_1}{2 - \nu_1} \right) \cos \alpha,$$

$$\gamma_{z\rho} = \frac{mz^{m-1}}{R_0 z_1^m} \left(\frac{r^2 - \rho^2}{2} \cdot \frac{1 + \nu_1}{2 - \nu_1} \right) \sin \alpha.$$

Интенсивность деформаций сдвига $\Gamma = 2\sqrt{\varepsilon_\alpha^2 + \varepsilon_\alpha\varepsilon_z + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{4}(\gamma_{\rho\alpha}^2 + \gamma_{\alpha z}^2 + \gamma_{z\rho}^2)}$.

Уравнение вариации полной потенциальной энергии системы, из которого определяется значение v_1 , согласно [2] преобразуем к виду:

$$\int_0^{z_1} \int_0^{2\pi} \int_{r-\frac{t}{2}}^{r+\frac{t}{2}} \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_1} \rho d\rho d\alpha dz + \frac{2\sqrt{3}\Gamma_c}{\sigma_s} \frac{\partial W}{\partial v_1} = 0, \text{ где } \Gamma_c = \sqrt{\frac{1}{V} \int_V \Gamma^2 dV}.$$

В развернутой записи данного уравнения сокращается принятое постоянным напряжением текучести σ_s , однако обратная величина m показателя функции упрочнения n , присутствующая в формулах деформаций $\gamma_{\alpha z}$ и $\gamma_{z\rho}$, влияет на результат решения. Для слабо упрочняющихся материалов ($n > 0,2$) получаем $v_1 \approx -0,1$ откуда следует: $\varepsilon_p = -0,4 r/R_0$. Для сплавов титана ($n = 0,1$) $v_1 = 0 \dots 0,2$ при $z_1/d = 2 \dots 4$ и абсолютные значения деформации ε_p , ответственной за утонение стенки трубы, возрастают до $0,5r/R_0$ и более.

При $\alpha = \pm\pi/2$ изменение толщины стенки $\Delta t = \varepsilon_p t_0$ достигает экстремальных рассчитанных значений Δt_{\min} и Δt_{\max} , равных по абсолютной величине, что противоречит практике. В действительности утонение стенки проявляется сильнее, нежели утолщение и это связано со смещением нейтральной поверхности деформации ε_z относительно оси трубы. Величину смещения определяем из условия равенства площадей стенки трубы в областях утонения и утолщения, в итоге

$$\frac{\Delta t_{\min, \max}}{t_0} = \mp \frac{r}{R_0} \cdot \frac{1 + v_1}{2 - v_1} - \frac{r^2}{2R_0^2}.$$

Графики на рисунке 2 иллюстрируют рассчитанное изменение толщины стенки трубы из стали 20 ($n = 0,161$) при относительной толщине стенки $t_0/d = 0,05$.

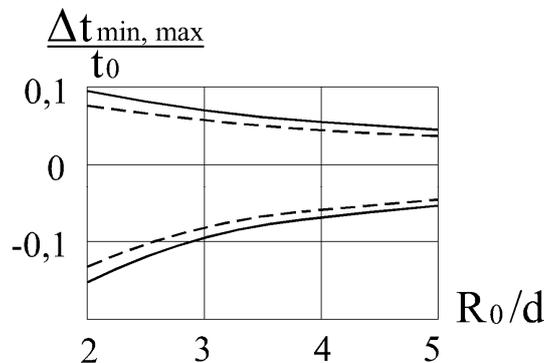


Рисунок 2 – Экстремальные изменения толщины стенки трубы в зависимости от относительных значений радиуса гибки R_0/d при $z_1/d = 2$ и $z_1/d = 4$ (пунктир)

Приобретаемая разнотолщинность стенки трубы увеличивается с уменьшением радиуса гибки R_0 . Преобладание утонения стенки над утолщением, как это видно из графиков, особенно заметно при малых радиусах гибки, что согласуется с производственным опытом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовин, С.И. Теория и расчеты гибки труб / С.И.Вдовин. – М.: «Машиностроение», Орел: ОрелГТУ, 2009. – 96 с.
2. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) /И.Я.Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго, В.Л. Колмогоров, В.Н. Трубин, Р.А. Вайсбурд, В.И. Тарновский; под ред. И.Я. Тарновского. М.: Металлургиздат, 1963. 672 с.

Вдовин Сергей Иванович

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры Автопласт
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Моб. и служ. тел.: 8-905-167-0517, 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

Лунин Константин Сергеевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
аспирант кафедры Автопласт
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Моб. и служ. тел.: 8-929-060-4242, 41-68-77
E-mail: kivinok2@mail.ru

Мальцев Денис Николаевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
аспирант кафедры Автопласт
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Моб. тел.: 8-920-283-57-40
E-mail: denis_28@inbox.ru

S.I. VDOVIN, K.S. LUNIN, D.N. MALTSEV

TUBE WALL TAPERING WHEN BENDING WITH COPYING TEMPLATE

Here is given a variational estimate of tube wall tapering when bending with copying template without sectional shape changing

Keywords: *plastic flow bowing; wall thickness variation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vdovin, S.I. Teorija i raschety gibki trub / S.I.Vdovin. – M.: «Mashinostroenie», Orel: OrelGTU, 2009. – 96 s.
2. Teorija obrabotki metallov davleniem (Variacionnye metody rascheta usilij i deformacij) /I.Ja. Tarnovskij, A.A. Pozdeev, O.A. Ganago, V.L. Kolmogorov, V.N. Trubin, R.A. Vajsburd, V.I. Tarnovskij; pod red. I.Ja. Tarnovskogo. M.: Metallurgizdat, 1963. 672 s.

Vdovin Sergey Ivanovich

State University - UNPK, Orel
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department Avtoplast
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Mob. and servi. Tel.: 8-905-167-0517, 41-68-77
E-mail: vdovostu@mail.ru

Lunin Konstantin Sergejevich

State University - UNPK, Orel
graduate student Avtoplast
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Mob. and servi. Tel.: 8-929-060-4242, 41-68-77
E-mail: kivinok2@mail.ru

Maltsev Denis Nikolaevich

State University - UNPK, Orel
graduate student Avtoplast
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Mob. Tel.: 8-920-283-57-40
E-mail: denis_28@inbox.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 539.3.374.1

А.Н. ВОЛКОВА, Е.Л. ТОРОПЦЕВА, С.К. АМБРОСИМОВ, А.Н. БОЛЬШАКОВ

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЕМ УСЛОВИЙ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ, СТРУКТУРОЙ И МИКРОТВЁРДОСТЬЮ СРЕЗАЕМЫХ СЛОЕВ

В статье представлены результаты исследований структуры и микротвёрдости участков стружки, соответствующих зонам выхода режущего клина из заготовки и установившегося резания.

Ключевые слова: микротвёрдость поверхности стружки, структура материала после обработки.

Изменение условий резания при выходе режущего клина из зоны обработки по данным [1] до 7 – 8 раз снижает стойкость инструментов. На повышение стойкости режущих инструментов, работающих в условиях прерывистого резания, можно повлиять, изучив процессы и закономерности, возникающие при так называемом «разгрузочном ударе» и вызывающие интенсивный износ инструмента. Предположительно это явление связано с резким увеличением напряжения, действующего на режущий клин. Для подтверждения этого предположения использована известная взаимосвязь [2] между величиной микротвёрдости и эффективным напряжением на прирезцовой стороне стружки и, как следствие, на передней поверхности режущего клина, соответствующих установившемуся резанию и процессу выхода зуба инструмента из зоны обработки.

Для проведения исследования были изготовлены образцы микрошлифов на прирезцовой поверхности стружки из стали 20 и стали У8, полученной при свободном ортогональном резании. Структуры образцов до обработки резанием представлены на рисунке 1. Сталь 20 имеет в исходном состоянии структуру перлита и феррита, а исходная структура образца из стали У8 представляет собой зернистый перлит. Химические составы стали 20 и стали У8 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химические составы сталей обрабатываемых образцов, (в % по массе)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	As	S	P	Ni	Cu
Сталь 20	0,175	0,28	0,41	0,14	0,023	0,021	0,012	0,08	0,24
У8	0,8	0,3	0,3	0,2	-	0,028	0,03	0,25	0,25

Образцы стружки были получены на токарно-винторезном станке модели 16К20 в процессе свободного ортогонального резания. В качестве заготовок использовались цилиндрические образцы – с максимальным диаметром 86 мм (сталь 20) и 61 мм (сталь У8). Вдоль образующей образцов выполнен паз шириной 3 мм и глубиной 20 мм. Обработка производилась отрезным резцом с шириной режущей части равной 4 мм изготовленной из стали Р18 (химический состав приведен в табл. 2).

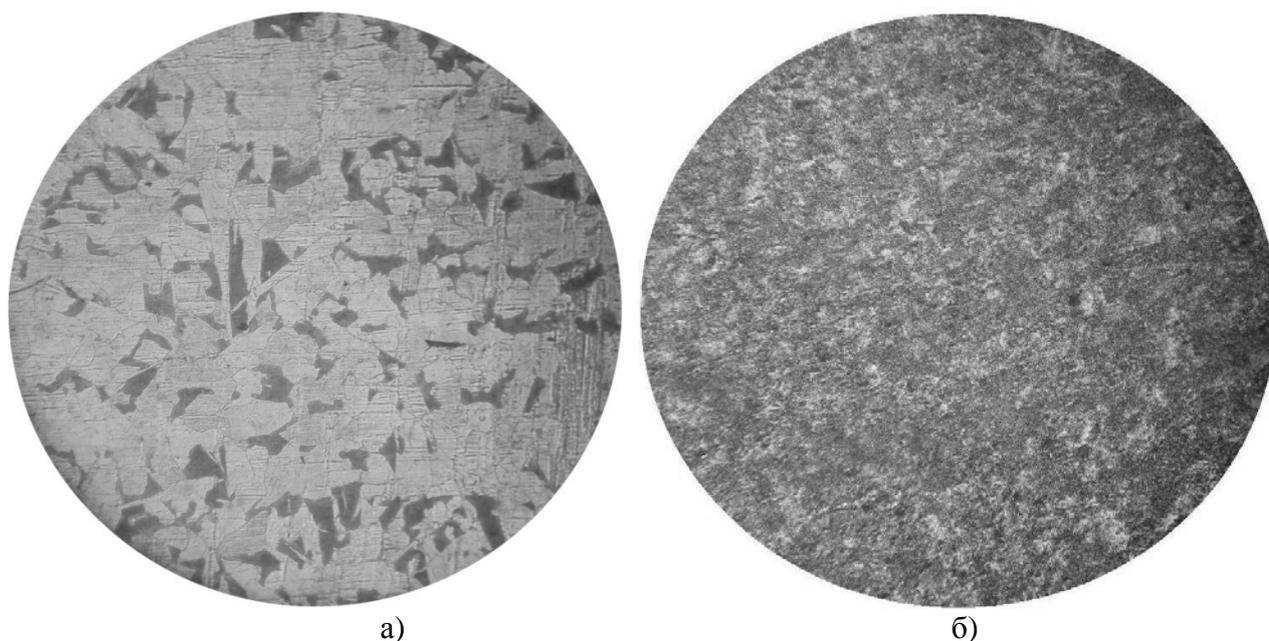


Рисунок 1 – Исходные структуры образцов обрабатываемых сталей, травленных 3%-м раствором HNO_3 на спирту в течении 5 секунд. $\times 100$

а – сталь 20, б – сталь V8

В ходе исследования структуры зоны деформации стали 20 после обработки резанием, было выявлено явное изменение формы и размеров зерен. Характер их изменения следующий: зерна вытягиваются в определенном направлении и становятся более тонкими. Измерение размера не менее 600 зерна перлита проводилось по снимкам структуры, полученным при увеличении в 100 раз на микроскопе «EPIQUANT» с помощью фотокамеры Canon Power Shot A75. на образцах с крайними значениями интервала изменения каждого из исследуемых параметров режима резания. Снимки структуры обрабатывались программой Image-Pro Plus 6.0. Размер зерна оценивался по двум параметрам: длине и ширине (рис. 2).

Таблица 2 – Химический состав материала режущей части инструмента, (в % по массе)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	S	P	Ni	Co
P18	0,78	0,5	0,5	4,1	1,0	18,0	1,2	0,03	0,03	0,4	0,5

По оси X при различных режимах резания их длина составляет 103-121 мкм в зоне установившегося резания и 104-133 мкм - в зоне выхода резца, при исходном размере в 37 мкм; по оси Y размеры зерна меняются до 23-29 мкм в зоне установившегося резания и до 18-25 мкм в зоне выхода резца, при исходной ширине зерна 86 мкм. Разница величин размеров зерен по осям в рамках изменения любого из трех исследуемых параметров режима резания незначительная и находится в пределах ошибки измерений. Анализ размеров зерен различных зон стружки показал, что зерна в зоне выхода режущего клина изменяются в большей степени, чем зерна в зоне установившегося резания в среднем на 5,8 % по оси X и на 17,3 % по оси Y.

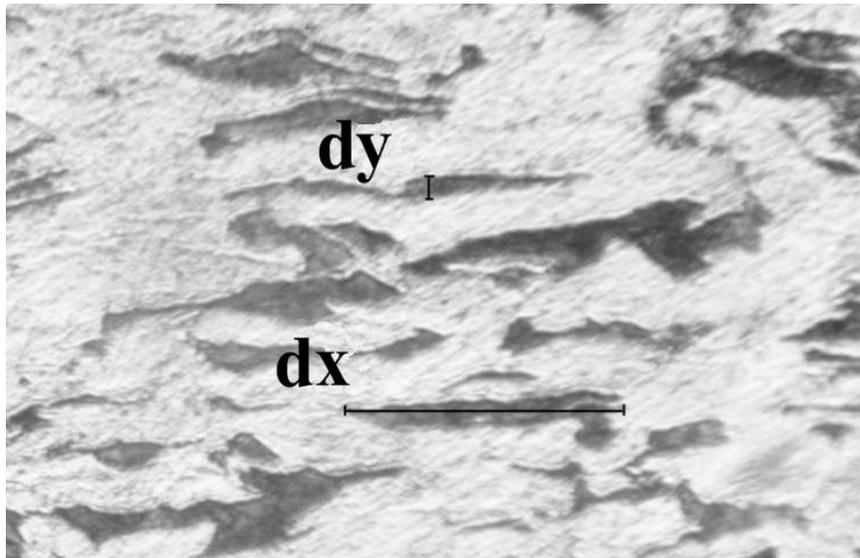


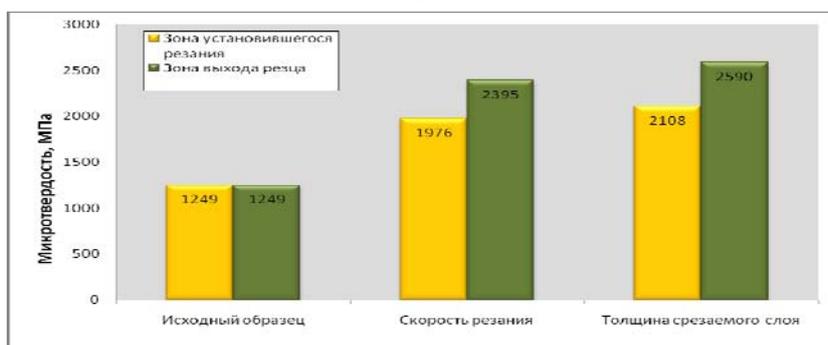
Рисунок 2 – Измерение размера перлитного зерна стали 20 после обработки (dy – ширина зерна; dx – длина зерна)

Измерение микротвёрдости образцов стружек из стали 20 и У8 осуществлялось на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,98 Н. Проведенные расчеты микротвёрдости, подтвердили различие в значениях микротвёрдости в исследуемых зонах. Участок стружки, принадлежащий зоне выхода резца, имеет большую микротвёрдость в среднем на 63,6 % у стали 20 и на 22 % у стали У8 по сравнению с зоной установившегося резания (рис. 3), а следовательно, и большую степень упрочнения, т.е. соответственно этот участок стружки больше деформирован, чем участок стружки, соответствующий зоне установившегося резания.

Экспериментально подтверждено, что микротвёрдость стружки из стали 20 увеличилась в процессе резания на 165 % в зоне установившегося резания, а в зоне выхода резца ее значение выше исходного на 333 %. Для образцов из стали У8 значения этих величин меньше и составляют 63 % и 100 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что упрочнение стали 20 в процессе резания относительно исходного состояния примерно в 3 раза выше упрочнения стали У8 независимо от зоны резания.



а



б

Рисунок 3 – Микротвёрдость образцов стружек из стали 20(а) и стали У8(б) до и после резания в различных зонах при измерении одного из параметров режима резания

Можно предположить, что разница в упрочнении представленных марок сталей обусловлена главным образом тонким строением структурных составляющих, а именно количеством феррита. Это доказывает, что металлографические исследования структуры металлов имеют большое значение для изучения явлений возникающих при резании.

Параметры режимов резания, толщина срезаемого слоя, скорость и передний угол по-разному влияют на степень упрочнения. Сильнее всего микротвёрдость изменяется при изменении переднего угла, степень упрочнения для образцов из стали 20 составляет 167 % в зоне установившегося резания и 382 % в зоне выхода резца. Скорость резания и толщина срезаемого слоя исследовались на обеих марках стали, при этом был выявлен одинаковый характер влияния: при изменении толщины срезаемого слоя степень упрочнения равна 169 % для стали 20 и 69 % для стали У8 в зоне установившегося резания и 319 % и 107 % соответственно в зоне выхода резца; при изменении скорости резания она равна 159 % для стали 20 и 58 % для стали У8 в зоне установившегося резания и 298 % и 92 % соответственно в зоне выхода резца.

Поскольку доказано, что эффективное напряжение возникающие в материале одно-значно связано с величиной микротвердости [2], можно утверждать, что напряжения, возникающие на прирезцовой поверхности стружки и на передней поверхности резца, увеличиваются при выходе резца из заготовки по сравнению с установившимся резанием.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования структуры и микротвердости образцов стружки из стали 20 и У8, полученных при свободном ортогональном прерывистом резании с различными режимами обработки соответствующих зонам выхода режущего клина и установившегося резания позволяют сделать следующие выводы:

1. Независимо от марки обрабатываемой стали и режима резания микротвердость участка стружки соответствующего зоне выхода резца выше участка стружки соответствующего установившемуся резанию.

2. Микротвердость в пределах изменения одного из параметров режима резания, толщины срезаемого слоя, переднего угла или скорости резания, в рамках любой из зон практически не изменяются.

3. Зерна перлита в образцах из стали 20 в процессе обработки резанием значительно деформируются, образцы из стали 20 упрочняются в большей степени, чем образцы из стали У8, в любой зоне резания.

4. На основании исследований микротвердости можно утверждать, что напряжения, возникающие на прирезцовой поверхности стружки и на передней поверхности резца, увеличиваются при выходе резца из заготовки по сравнению с установившимся резанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонян, М.М. Влияние ударных воздействий и адгезионных явлений на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании [Текст] / М.М. Симонян, М.О. Навоян, К.С. Кочарян // Вестник машиностроения. – 2006, №9. – С.67 – 69.
2. Дель, Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости [Текст] / Г.Д. Дель. М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

Волкова Анна Николаевна

ОАО Индезит, отдел главного конструктора,
Инженер-конструктор

Торопцева Елена Львовна

Липецкий государственный технический университет
Кандидат технических наук, доцент кафедры физического металловедения
Тел.(4742) 43-44-10

Амбросимов Сергей Константинович

Липецкий государственный технический университет

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (4742) 74-39-36

Большаков Алексей Николаевич

Липецкий государственный технический университет

аспирант кафедры «Технология машиностроения»

Тел. 8-951-305-36-62

A.N. VOLKOVA, E.L. TOROPTSEVA, S.K. AMBROSIMOV, A.N. BOLSHAKOV

**INTERRELATION BETWEEN CHANGE OF CONDITIONS
OF FALTERING CUTTING, STRUCTURE AND MICROHARDNESS
OF CUT-OFF LAYERS**

In this article results of researches of structure and microhardness of parts of the chips corresponding to zones of an exit of the cutting wedge from preparation and established cutting are presented.

Keywords: Microhardness of a surface of chip, material structure after processing.

BIBLIOGRAPHY

1. Simonjan, M.M. Vlijanie udarnyh vozdejstvij i adgezionnyh javlenij na stojkost' tverdosplavnogo instrumenta pri preryvistom rezanii [Tekst] / M.M. Simonjan, M.O. Navojan, K.S. Kocharjan // Vestnik mashi-nostroenija. – 2006, №9. – S.67 – 69.

2. Del', G.D. Opredelenie naprjazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeleniju tvjordosti [Tekst] / G.D. Del'. M.: Mashinostroenie, 1971. – 200 s.

Volkova Anna Nikolaevna

ОАО Индезит,

Department of the main designer,

Engineer - designer

Toropceva Elena L'vovna

Lipetsk state technical university

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of faculty of physical metallurgical science

Tel.(4742) 43-44-10

Ambrosimov Sergey Konstantinovich

Lipetsk state technical university

Dr.Sci.Tech., the professor of faculty

«Technology of mechanical engineering»

Tel. (4742) 74-39-36

Bolshakov Alexey Nicolaevich

Lipetsk state technical university

The post-graduate student of faculty « Technology of mechanical engineering »

Tel. 8-951-305-36-62

УДК 621.001.4

А.О. ГОРЛЕНКО, П.А. ТОПОЛЯНСКИЙ, А.П. ТОПОЛЯНСКИЙ,
Н.А. СОСНИН, С.А. ЕРМАКОВ, А.Н. ЕРОХИН

ТЕХНОЛОГИЯ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрена технология финишного плазменного упрочнения с нанесением многослойного нанопокрывтия системы Si-O-C-N применительно к упрочнению металлорежущего инструмента. Исследованы трибологические характеристики наносимого износостойкого антифрикционного покрытия. Приведены результаты промышленного испытания технологии финишного плазменного упрочнения металлорежущего инструмента.

Ключевые слова: модификация, финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрывтие, трибологические испытания.

Для российских промышленных предприятий наиболее рационально для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий использовать малогабаритное, безвакуумное, недорогое и простое в обслуживании оборудование. В соответствии с этой концепцией разработана технология бескамерного химического осаждения тонкопленочных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (*PECVD by cold atmospheric plasma*) [1].

Плазменная активация обеспечивает повышенное качество подготовки поверхности подложки, ведет к более быстрому прохождению химических реакций, а также к более высоким скоростям осаждения покрытия.

В соответствии с данной идеологией разработана новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ), объединяющая положительные эффекты процессов *MO-CVD* и *PE-CVD*. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы.

Процесс образования покрытия при ФПУ протекает в несколько стадий:

- создание устойчивого потока плазмы дугового разряда;
- испарение технологических препаратов в жидкостном питателе и перенос их паров совместно с дополнительным потоком газов в плазму дугового разряда;
- получение в плазмохимическом реакторе пароплазменного потока, содержащего атомы, положительно и отрицательно заряженные ионы и электроны;
- прохождение плазмохимических реакций в плазме дугового разряда с образованием новых соединений и их перенос плазменной струей к подложке;
- конденсация паров и продуктов реакций на подложке при касании факела плазменной струи поверхности изделия;
- взаимодействие между адсорбированными осажденными веществами и граничным слоем поверхности подложки, приводящее к зарождению и росту покрытия.

Вышеперечисленные стадии присутствуют, как известно, и в *PVD* процессах. Но в отличие от них при ФПУ покрытие образуется при атмосферном давлении окружающей среды без применения вакуумных камер. Кроме этого износостойкие покрытия наносимые в вакууме методами *PVD* на подложку с температурой поверхности менее 250 °С обычно имеют пониженную адгезию.

В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ используется плазменная струя, истекающая при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, дополненного плазмохимическим реактором.

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 150 °С; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Применительно к повышению долговечности металлорежущего инструмента в соответствии с рассмотренными механизмами их износа, а также анализа свойств бинарных однофазных твердых соединений, которые хорошо изучены, при ФПУ используются кремний-содержащие покрытия.

Исследованиями покрытий *Si-C*, *Si-N*, *Si-C-N*, наносимых *CVD* процессами [2], выявлено, что их физико-химические свойства (механическая прочность, химическая стойкость, твердость, теплопроводность, коэффициент термического расширения, электрическое сопротивление, коэффициент трения), обусловленные наличием химических связей между всеми атомами, имеют уникальные характеристики. Варьируя их фазовый и химический состав, можно в широком диапазоне изменять их физико-механические и химические свойства, что открывает широкие возможности для создания материалов с заданными характеристиками. При этом разработанная технология ФПУ позволяет получать покрытия на основе соединений кремния с различным содержанием элементного состава.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия на основе системы *Si-O-C-N*, взятым за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, пары которых вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной отличительной особенностью процесса ФПУ является также то, что нанесение покрытия осуществляется многослойно при толщине каждого слоя порядка 2...10 нм полосами шириной 8...10 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменная струя перемещается со скоростью 3...150 мм/с.

Микрорельеф переходной зоны «участок с покрытием – участок без покрытия» исследовался с использованием прибора *MarSurf WS1* (фирма *Mahr GmbH*, Германия). Анализ полученной трехмерной профилограммы (рис. 1) показал, что на зоне без покрытия (слева) имеются достаточно глубокие впадины, имеющие размер в соответствии с масштабной линейкой порядка 1,0...1,2 мкм, оставшиеся от абразивной обработки исходной поверхности. На зоне с покрытием (справа) впадины имеют глубину порядка 0,1 мкм. Таким образом, на основании анализа трехмерной профилограммы видно, что после ФПУ обеспечивается «залечивание» микродефектов и практически всех впадин исходной шероховатости. Это может быть обосновано тем, что покрытие по своей физической сущности осаждается в большей степени во впадинах микрорельефа поверхности, а также образованием в подпленочной зоне сжимающих остаточных напряжений, обеспечивающих «залечивание» дефектных зон.

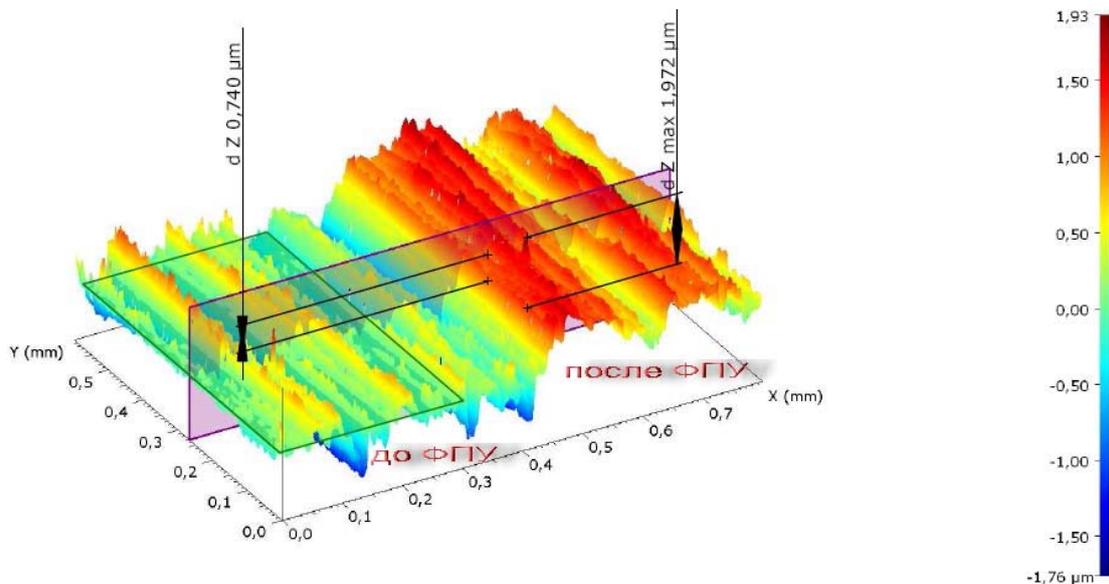


Рисунок 1 – Трехмерная профилограмма переходной зоны слева – участок без покрытия, справа – участок с покрытием

Субмикрорельеф поверхностей образцов (рис. 2), исследовавшийся на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную топографию, присущую поверхности после ФПУ с нанесением покрытия системы *Si-O-C-N* (в то время как субмикрорельеф поверхности до нанесения покрытия имеет явно выраженные следы – риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки). Изменение топографии поверхности после ФПУ является также подтверждением «залечивания» дефектных зон, образованных на предшествующей технологической операции шлифования.

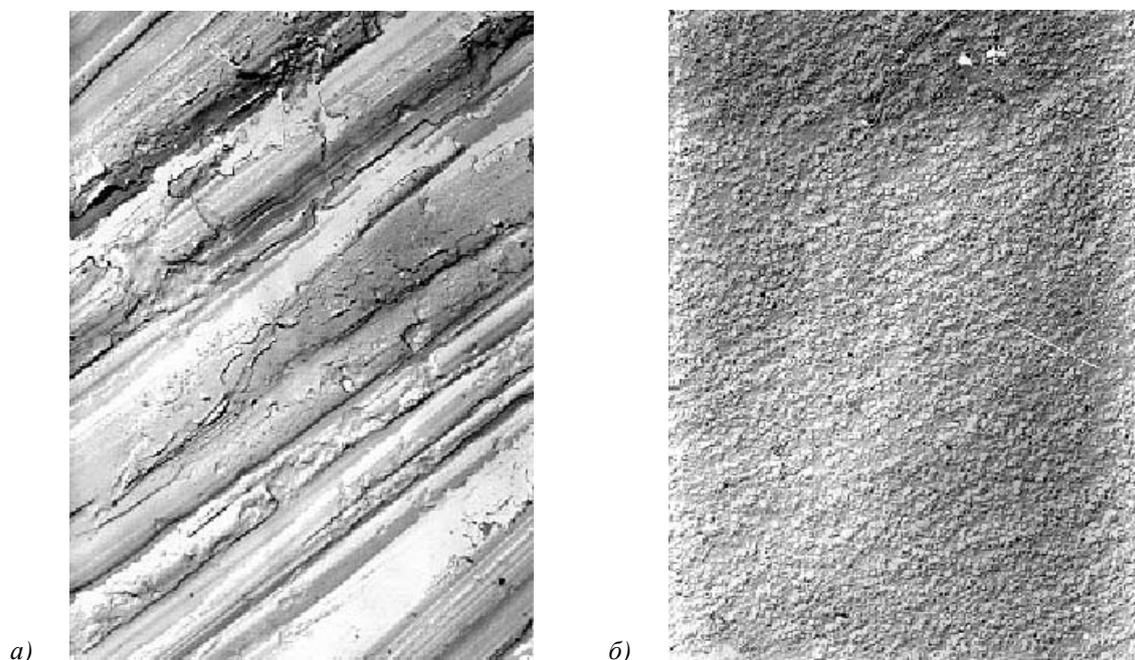


Рисунок 2 – Микрорельеф поверхности до (а) и после (б) ФПУ с нанесением покрытия системы *Si-O-C-N* (x5000)

Исследования трибологических характеристик покрытия системы *Si-O-C-N* проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М. Данное оборудование предназначено для определения трибологических свойств цилиндрических образцов из металлических материалов и сплавов нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480-97 при трении скольжения и граничной смазке [3].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств:

- время приработки t_0 , ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- приработочный износ h_0 , мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания приработки t_0 ;
- значение коэффициента трения в конце испытаний f ;
- f_0/f – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к его значению в конце испытаний f ;
- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{h - h_0}{L - L_0},$$

где h , мкм, – суммарная величина износа образца за время испытаний;

L , мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний;

$L_0 = 3,6 \cdot 10^9 \cdot t_0 \cdot v$, мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки;

- значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $I_{h\Sigma} = h/L$.

Испытания образцов с покрытием и без покрытия проводились при следующих условиях: скорость скольжения $v = 1$ м/с; нормальное усилие нагружения $N = 100 \pm 0,5$ %, Н (со-

ответствует давлениям, рассчитанным по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунами-ем; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло промышленное И – 20А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 8 ч.

Результаты испытаний покрытия системы *Si-O-C-N* и материала основы (стали Р18) без покрытия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты трибологических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Трибологическое свойство	Показатель	Значение показателя для образца	
		с покрытием <i>Si-O-C-N</i>	сталь Р18
Прирабатываемость	t_0 , ч	0,33	5,33
	h_0 , мкм	0,90	9,00
	f_0/f	4,75	1,36
Антифрикционность	f	0,04	0,28
Износостойкость	h , мкм	6,90	12,10
	$I_h \cdot 10^{-10}$	2,16	3,17
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	2,38	4,18

На рисунке 3 приведены протоколы испытаний покрытия *Si-O-C-N* и материала основы (стали Р18) без покрытия с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

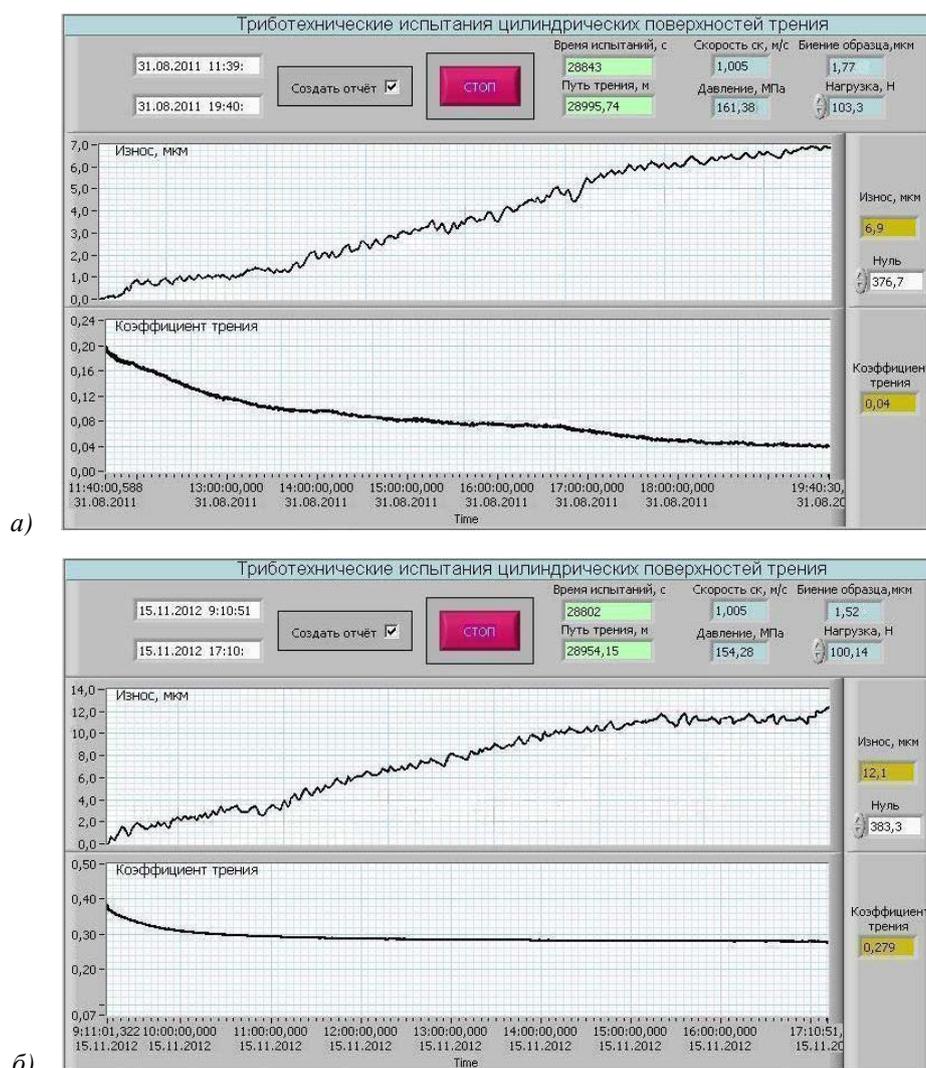


Рисунок 3 – Протоколы испытаний
а) покрытия *Si-O-C-N*, б) материала основы (стали Р18) без покрытия

Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия *Si-O-C-N* и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает практически в 7 раз меньшим значением коэффициента трения. При этом в 16 раз сократилось время приработки и в 1,5...1,75 раза уменьшилась интенсивность изнашивания. При оценке кривой износа покрытия *Si-O-C-N* видно, что длительность приработки составляет 0,33 часа, далее 1,67 часа стабильного износа, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. В пределах толщины покрытия *Si-O-C-N* (1 мкм) кривая износа практически постоянна во времени. Кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику. Плавное снижение в течение 3 часов, а затем некоторая стабилизация с незначительным уменьшением, что свидетельствует о возможном «залечивании» дорожки трения микроскопическими продуктами износа.

Микрофотографии дорожки износа при испытаниях на трибометре *Tribometer (CSM, Швейцария)* в условиях сухого трения покрытия системы *Si-O-C-N* подтвердили образование продуктов, которые не выносятся, а остаются на дне дорожки, обеспечивая «залечивание» участков износа (рис. 4).



Рисунок 4 – Микрофотография дорожки износа, полученная на оптическом микроскопе AXIOVERT CA25 (Karl Zeiss, Германия), $\times 100$

На основании проведенных трибологических испытаний выявлено, что более эффективным по параметрам трения и изнашивания является поверхность с покрытием системы *Si-O-C-N*.

В таблице 2 приведены результаты промышленных испытаний стойкости резбонарезного инструмента после финишного плазменного упрочнения с нанесением покрытия системы *Si-O-C-N*, проведенного в различных организациях. Многократное повышение стойкости резбонарезного инструмента подтвердили результаты исследований физико-механических и трибологических свойств данного покрытия. Вид процесса финишного плазменного упрочнения показан на рисунке 5.

Таблица 2 – Результаты промышленного испытания резьбонарезного инструмента

Тип инструмента	Материал обрабатываемой заготовки	Стойкость до упрочнения	Стойкость после упрочнения	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Метчик М3	ВТ1-0	5 отв.	12 отв.	2,4	НПЦ «ПО «Старт», г. Заречный
Метчик М8	40Х	2 час	6 час	3,0	«Морской завод», г. Кронштадт
Метчик М10	12Х18Н10Т	1 час	2,25 час	2,25	«Электрокомплекс», г. Минусинск
Метчик М16	35Л	8 отв.	80 отв.	10,0	«Вагоностроительный завод», г. Усть-Катав
Метчик М24	40Х	80 отв.	240 отв.	3,0	«Калужский турбинный завод», г. Калуга

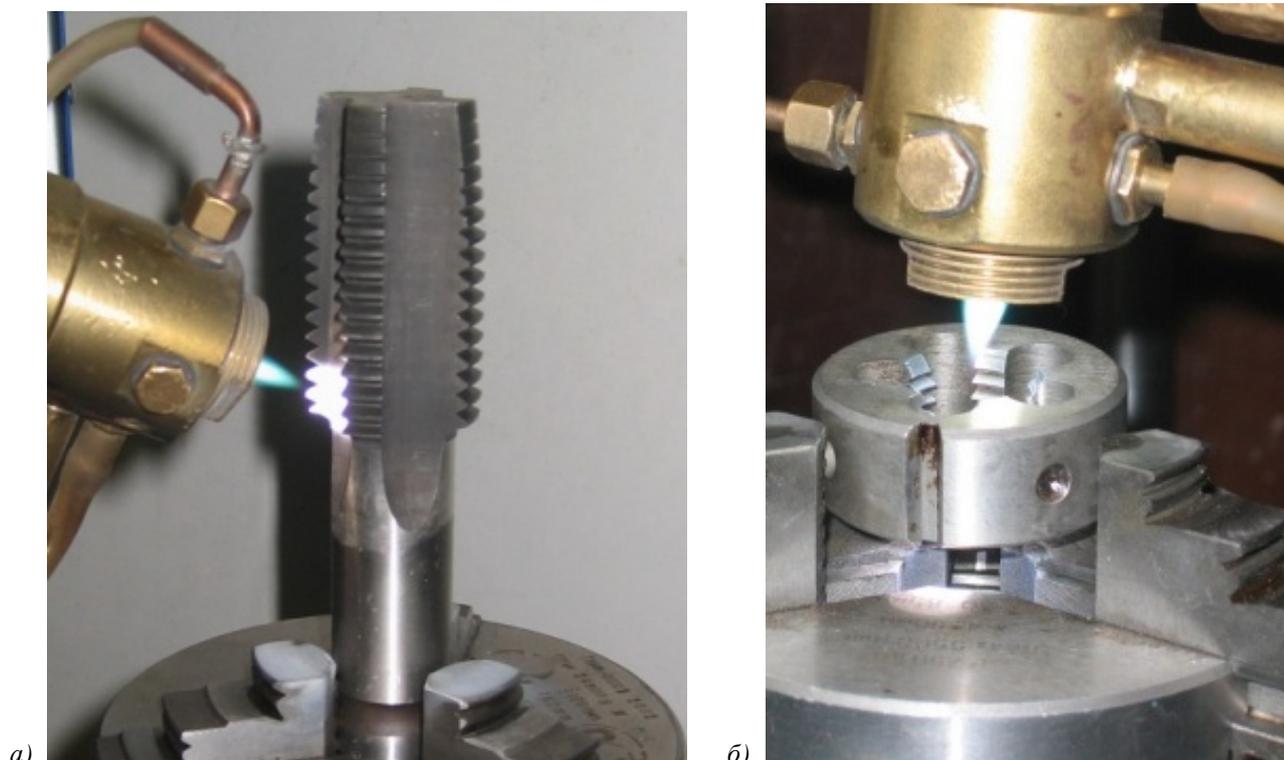


Рисунок 5 – Процесс финишного плазменного упрочнения резьбонарезного инструмента
а) метчика, б) плашки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соснин, Н.А. Плазменные технологии / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. – 406 с.
2. Chena C.W., Huang C.C., Lina Y.Y., Chenb L.C., Chenc K.H.. The affinity of Si–N and Si–C bonding in amorphous silicon carbon nitride (a-SiCN) thin film. *Diamond & Related Materials* 14, 2005. – P. 1126 - 1130.
3. Горленко, А.О. Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего покрытия / А.О. Горленко, И.Л. Шупиков, П.А. Тополянский, А.П. Тополянский // *Металлообработка*, № 2 (68), 2012. – С. 31 - 36.

Горленко Александр Олегович

Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск
 Академик академии проблем качества, д-р техн.наук, профессор, профессор каф. «Автомобильный транспорт»
 Служебный адрес: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7 (БГТУ)
 Тел. +7(906)5014632
 E-mail: bugi12@bk.ru

Тополянский Павел Абрамович

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), г. Санкт-Петербург
Канд.техн.наук, доцент, доцент каф. "Сварка и лазерные технологии"
Служебный адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29 (СПбГПУ).
Тел. +7(901)3200802
E-mail: topoljansky@mail.ru

Тополянский Андрей Павлович

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), г. Санкт-Петербург
Аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета
Генеральный директор ООО «НПФ «Плазмацентр»
Служебный адрес: 195112, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103.
Тел. +7(953)3540979
E-mail: andrey@plasmacentre.ru

Соснин Николай Алексеевич

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), г. Санкт-Петербург
Д-р техн.наук, профессор, профессор каф. "Сварка и лазерные технологии"
Служебный адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29 (СПбГПУ)
Тел. +7(812) 5527373
E-mail: info@plasmacentre.ru

Ермаков С.А.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), г. Санкт-Петербург
Канд.техн.наук, доцент, доцент каф. "Сварка и лазерные технологии"
Служебный адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29 (СПбГПУ)
Тел. +7(812) 5527373
E-mail: info@plasmacentre.ru

Ерохин Александр Николаевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск
Ведущий инженер каф. «Автомобильный транспорт»
Служебный адрес: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7 (БГТУ)
Тел. +7(920)8452183
E-mail: aleksanerokhin69@yandex.ru.

A.O. GORLENKO, P.A. TOPOLYANSKY, A.P. TOPOLYANSKY,
N.A. SOSNIN, S.A. ERMAKOV, A.N. EROKHIN

**THE TECHNOLOGY OF FINISHING PLASMA HARDENING FOR
INCREASE IN SERVICE LIFE OF CUTTING TOOLS**

Considered the technology of finishing plasma hardening with the application of multilayer nano coating systems Si-O-C-N in relation to the hardening of metal-cutting tool. Investigated tribological characteristics caused by wear-resistant anti-friction coating. Given the results of industrial tests of technology of finishing plasma hardening of metal-cutting tool.

Key words: *modification, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, tribological tests.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sosnin, N.A. Plazmennye tehnologii / N.A. Sosnin, S.A. Ermakov, P.A. Topoljanskij. – Rukovodstvo dlja inzhenerov. SPb: Izd-vo Politehnicheskogo univ-ta, 2008. – 406 s.
2. Chena C.W., Huanga C.C., Lina Y.Y., Chenb L.C., Chenc K.H.. The affinity of Si–N and Si–C bonding in amorphous silicon carbon nitride (a-SiCN) thin film. *Diamond & Related Materials* 14, 2005. – P. 1126 - 1130.
3. Gorlenko, A.O. Modifikacija rabochih poverhnostej detalej naneseniem uprochnjajushhego pokrytija / A.O. Gorlenko, I.L. Shupikov, P.A. Topoljanskij, A.P. Topoljanskij // *Metalloobrabotka*, № 2 (68), 2012. – S. 31 - 36.

Gorlenko Alexandr Olegovich

Bryansk state technical university, Bryansk

The academician of academy of problems of quality, д.т.н., the professor, the professor faculties "Motor transport"

Tel.: +7(906)5014632

E-mail: bugi12@bk.ru

Topolyanskiy Pavel Abramovich

The St.-Petersburg state polytechnical university, Saint Petersburg

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, the senior lecturer faculties " Welding and laser technologies "

Tel.: +7(901)3200802

E-mail: topoljansky@mail.ru

Topolyanskiy Andrey Pavlovich

St.-Petersburg state polytechnical university, Saint Petersburg

Post-graduate student of St.-Petersburg state polytechnical university,

General director of Open Company

NPF " Plazmatsentr»

Tel.: +7(953)3540979

E-mail: andrey@plasmacentre.ru

Sosnin Nikolay Alexeevich

St.-Petersburg state polytechnical university, Saint Petersburg

Dr.Sci.Tech., the professor, the professor faculties " Welding and laser technologies "

Tel.: +7(812) 5527373

E-mail: info@plasmacentre.ru

Ermakov S.A.

St.-Petersburg state polytechnical university, Saint Petersburg

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, the senior lecturer faculties. " Welding and laser technologies »

Tel.: +7(812) 5527373

E-mail: info@plasmacentre.ru

Erohin Alexandr Nikolaevich

Bryansk state technical university, Bryansk

Conducting engineer faculties "Motor transport"

Tel.: +7(920)8452183

E-mail: aleksanerokhin69@yandex.ru.

ТРИБОМЕХАНИКА ПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ УПРОЧНЕНИИ ВАЛОВ НАКАТЫВАНИЕМ

Для поверхностного упрочнения валов накатыванием изучены причины образования дефектов в очаге деформации. С целью повышения качества поверхностного слоя технологическим путем предложена коническая форма накатного ролика, обеспечивающая однородную деформацию. Введен фактор трения ролика о поверхность. Проведено математическое моделирование деформационного взаимодействия поверхностей в условиях комбинированного нагружения нормальной и касательной нагрузками с использованием теории пластичности. Теоретические расчеты показали достаточное соответствие экспериментальным результатам, что указывает на возможность оптимизации технологии и прогнозирования параметров упрочнения.

Ключевые слова: деформация, поверхность, напряжение, упрочнение, предел текучести, внедрение, трение.

Практика применения тороидальных роликов показала, что при накатывании, тем более при обеспечении глубокого наклепа, в наружных слоях детали часто образуются микротрещины, надрывы и другие повреждения. В связи с этим рекомендуют проводить после накатывания (или совместно с ним) дополнительную механическую обработку упрочненной поверхности точением, направленную на удаление наружного слоя определенной толщины с дефектами. Проведение такой обработки нерационально, так как при этом – а) увеличивается число операций механической обработки, б) уменьшается толщина упрочненного слоя, в) повышается высота микронеровностей, что приводит к ухудшению параметров опорной кривой (снижению несущей способности поверхности), увеличению концентрации напряжений и т.п.

При накатывании в зоне контакта тороидального ролика с валом возникает очаг деформации. Традиционно считается, что его размеры и форма определяются радиусом R рабочего профиля ролика и радиальным усилием F прижатия ролика к валу. Однако, рассматривая процесс деформирования в общей постановке, становится ясным, что фактор F не может считаться объективным, так как одно и то же усилие для материалов с разными механическими свойствами вызывает разные деформации и, следовательно, разные размеры и форму очага деформации. Целесообразно за фактор F принять не усилие, а глубину внедрения a ролика в тело вала (величину натяга).

В процессе движения перед роликом образуется волна вспучивания. Установлено [1], что разрушения развиваются в ее вершине. При этом образовавшаяся наружная трещина закатывается роликом, становясь внутренним дефектом поверхностного слоя. Эта поврежденность частично может залечиваться, но оставшаяся часть будет определять эксплуатационные надежность и долговечность вала.

Анализ условий деформирования поверхностного слоя вала в пределах дуги контакта с роликом показал: а) в осевом сечении деформация вдоль этой дуги неоднородна из-за переменной угла между профилем ролика и валом, б) в касательной плоскости окружные деформации растяжения, обуславливающие появление трещины, из условия постоянства объема при пластическом деформировании, вызываются осевыми деформациями сжатия. В связи с этим, критические деформации растяжения локализуются в вершине волны как в наиболее ослабленном по высоте сечении. Снижение высоты и пропорциональное увеличение сечения волны можно обеспечить снижением угла между профилем ролика и поверхностью вала (угла контакта) и его стабилизацией. Такую геометрию волны дает ролик с конической рабочей поверхностью, который, кроме того, благодаря постоянству угла контакта, обеспечивает более однородную деформацию поверхностного слоя вала с меньшей вероятностью образования опасных сдвигов кристаллической решетки.

При поиске эффективных режимов накатывания традиционно используется эмпирический путь. Однако он не позволяет прогнозировать направление и уровень влияния отдельных факторов, затрудняет раскрытие общих закономерностей формирования параметров упрочнения, не обеспечивает использование ЭВМ для оптимизации технологии накатывания. Поэтому было применено математическое моделирование на основе теории обработки металлов давлением с учетом контактного трения ролика о деталь. При этом введение фактора трения является принципиально новым для накатывания..

Сопротивление сдвигу является общепризнанным параметром локального пластического контакта. Такой контакт находится в условиях комбинированного нагружения нормальной и касательной нагрузками, регламентированного условием пластичности. В соответствии с теорией обработки металлов давлением контактное трение может возбудить на поверхности касательное напряжение τ , достигающее величины $0,5\sigma_s$ (σ_s - истинный предел текучести). Для толщины упрочняемого при накатывании слоя влияние τ такого уровня весьма существенно. Таким образом, трение ролика о деталь является составной частью общей структуры неоднородного деформирования, имеющей частные и общие признаки (законы трения и напряженно-деформированное состояние). При этом условия трения не являются граничными условиями, они возникают по законам самоорганизации [2].

Адекватность принятой теоретической модели условиям поверхностного деформирования оценивалась по виду преобладающей деформации, по напряженно-деформированному состоянию, по форме очага деформации

Деформация металлов всегда является упруго-пластической, но математический аппарат теории упруго-пластической деформации настолько сложен, что даже при допущении материала идеально пластичным, до сих пор не удалось установить единых общих методов описания поведения материалов. С целью упрощения в некоторых теоретических решениях используют положение теории упругости о деформации в точке под действием сосредоточенной силы (например, при определении глубины наклепа). Несмотря на совпадение с экспериментом при использовании поправочных коэффициентов такие решения не являются корректными, так как – а) контакт ролика с деталью реализуется не в точке, а по площадке; б) в месте контакта имеет место не упругая деформация, а пластическая.

Кроме того, известно, что доля упругих деформаций при пластическом деформировании составляет не более 0,1%, так как исчерпание упругости наступает при степени деформации 0,001...0,002, а степень деформации при накатывании достигает 0,3 [1]. Значит, при накатывании преобладающей является пластическая деформация и в описании процесса формирования упрочненного слоя следует использовать подходы для пластического контакта.

При решении практических задач по накатыванию возникают трудности, связанные с учетом объемности напряженно-деформированного состояния. Решения становятся настолько громоздкими, что теряют свою инженерную ценность. С достаточным для практики приближением при накатывании валов можно принять плоское деформированное состояние, а материал считать жесткопластическим (упругие деформации отсутствуют). Для выбора плоскости деформирования имеется ряд косвенных признаков. Прежде всего, к ним относятся результаты экспериментальных исследований процесса накатывания (проведенные в ЦНИИ МПС и ставшие классическими [3]) показавшие путем измерения, что осевые напряжения являются наибольшими, а радиальные – наименьшими напряжениями. Это подтвердила и более выраженная текстура металла в осевом направлении. Аналогичные выводы делаются в работе [1].

Накатывание валов характерно тем, что деформации локализуются в малой приповерхностной области, занимающей весьма малый объем по сравнению с объемом заготовки. В этих случаях используют модель взаимодействия индентора определенной формы (шарового, цилиндрического, конического и др.) с идеализированным полупространством (упругим или пластическим). Типичными видами взаимодействия являются вдавливание, качение или скольжение. При накатывании валов следует рассматривать пластическое вдавливание со скольжением.

С учетом изложенного процесс накатывания моделировался взаимодействием конического индентора с жесткопластическим полупространством, аналогично математическому моделированию в работах [5,6]. Индентор, нагруженный нормальной и касательной нагрузками, перемещается в условиях пластического вдавливания и внедрен в полупространство на величину a . Образующая конического индентора составляет с границей полупространства угол контакта β . Пластическая деформация, вызванная индентором, распространяется на глубину h . Вдоль контактной поверхности действует удельная сила трения τ , определяемая законом Зибеля.

В моделировании использовался метод баланса работ внешних и внутренних сил для очага деформации [4,7], предполагающий отсутствие влияния касательной силы на распределение главных напряжений, но учитывающий возможность изменения механических свойств материала (упрочнение). Применялось условие пластичности Треска.

Для учета процесса упрочнения в моделировании использовалась опытная кривая упрочнения для стали 40Х [7]. Анализ кривой упрочнения показал, что в исследуемом диапазоне относительных деформаций для нее характерно пологое повышение предела текучести. Поэтому с достаточной точностью зависимость предела текучести σ_s от относительной деформации можно линеаризовать и представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_o + P_o \varepsilon, \quad (1)$$

где σ_o - экстраполированный предел текучести при отсутствии деформации,

P_o - модуль упрочнения,

ε - относительная деформация.

При введении соответствующих обозначений уравнение (1) приводится к уравнению в относительной форме

$$\varphi = P \varepsilon, \quad (2)$$

где φ - относительная степень упрочнения,

P - относительный модуль упрочнения.

В результате математического моделирования для $\varepsilon \leq 0,3$ была получена зависимость, устанавливающая связь условий накатывания и способности материала к упрочнению, выражаемой формулой (2), с относительной степенью упрочнения φ в виде функции

$$\varphi = f\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}, \beta, \mu, P\right), \quad (3)$$

где σ - нормальное к поверхности вала напряжение,

μ - коэффициент контактного трения.

В плоской постановке при нестесненном пластическом деформировании проекция b площади контакта S конического индентора с полупространством (если пренебречь образованием наплыва) всегда пропорциональна глубине внедрения a , т.е.

$$b = ka, \quad (4)$$

где k - безразмерный коэффициент пропорциональности.

С другой стороны нормальную нагрузку F , действующую на индентор, с учетом (9) можно определить по уравнению

$$F = q_m bz = q_m kaz, \quad (5)$$

где q_m - среднее давление в контакте,

$z = 1$ - линейный размер, перпендикулярный главной плоскости деформирования.

Известно [8], что при нестесненном пластическом деформировании $q_m = C \sigma_s$ (C - константа, зависящая от трения и геометрии индентора). Предполагая, что независимо от глубины внедрения и нагрузки на площади контакта всегда существует линейный размер l_0 , на котором внешняя нагрузка инициирует постоянную интенсивность влияния (погонную нагрузку), из выражения (5) можно получить

$$\frac{a}{l_0} = \frac{F}{C\sigma_s k z l_0} = \frac{\sigma}{\sigma_s},$$

$$a = l_0 \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (6)$$

Из (6) следует важный вывод о том, что при нестесненном пластическом деформировании (имеющем место в процессе накатывания роликом) отношение $\frac{\sigma}{\sigma_s}$ прямо пропорционально глубине внедрения a . Проведенные оценочные расчеты это полностью подтвердили.

Таким образом, для конкретного материала вала и принятых условий смазывания Π и μ постоянные величины. Поэтому решение уравнения (3), являясь функцией двух аргументов, представляет собой семейство зависимостей, представленное на рисунке 1

Экспериментальное определение одного из значений φ при произвольно выбранном сочетании a и β (например, для образца с глубиной внедрения $a = 0,25$ мм) позволяет установить величину произведения Ck в уравнении (6), удовлетворяющее, всем сочетаниям a и β . Следовательно, на основании выражения (6)

в уравнении (3) величина $\frac{\sigma}{\sigma_s}$ является пропорциональной глубине внедрения a . Таким образом, при $\Pi = const$ и $\mu = const$ уравнение (3) приводится к функции

$$\varphi = f(a, \beta).$$

Экспериментальная оценка достоверности разработанной математической модели проводилась с использованием конических роликов с углами контакта 5, 10, 15 и 20° при величинах натяга 0,25...1,75 мм. С целью сравнительной оценки проводились опыты с тороидальным роликом. Накатывались образцы валов из стали 40Х диаметром 60 мм.

Степень упрочнения накатанных образцов оценивалась по приросту относительной микротвердости поверхности. Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3М по соответствующей методике.

Результаты расчета показали близкое соответствие результатам опытов (рис. 1), что указывает на достоверность примененного математического моделирования. При этом было установлено, что угол контакта и натяг существенно влияют на параметры упрочнения, а ролик с конической рабочей поверхностью по упрочняющей способности более эффективен, чем тороидальный (в 1,5...1,6 раза).

Представленные результаты теоретического и экспериментального исследования показывают, что рассмотрение механики пластического контакта в трибологическом аспекте позволяет более полно раскрыть общие закономерности упрочнения валов и, следовательно, оптимизировать технологию накатывания с прогнозируемым результатом упрочнения.

Работа выполнялась в рамках хоздоговорной НИР, заказчик «Горьковская железная дорога – филиал ОАО «Российские железные дороги».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Макушок, Е.М. Основные направления развития механики трения / Е.М. Макушок // Трение и износ, №3, Т.16, 1995, С. 416 – 427.

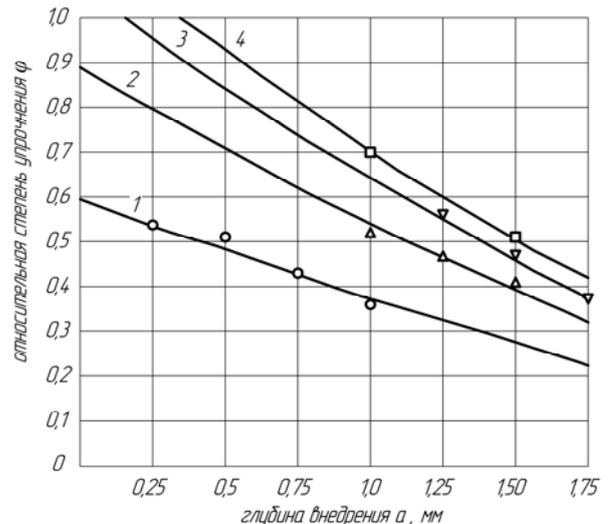


Рисунок 1 – Зависимость относительной степени упрочнения φ от глубины внедрения a и угла контакта β
(сплошные линии – расчет, точки – эксперимент; 1 – $\beta=5^\circ$, 2 – $\beta=10^\circ$, 3 – $\beta=15^\circ$, 4 – $\beta=20^\circ$)

3. Школьник, Л.М. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л.М. Школьник, В.И. Шахов. – М.: Машиностроение, 1964. – 184 с.
4. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. Пер. с англ./Пер. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
5. Зелинский, В.В. Условие пластического равновесия при трении нагруженных поверхностей / В.В. Зелинский // Производственные технологии и качество продукции: Материалы IV Международной научно-технической конференции, 25-27 сентября 2001 г. Владимир / Под ред. проф. В.Ф. Коростелева. Москва «Новые технологии», 2001, с. 203-206
6. Зелинский, В.В. Установление связи между параметрами трибоконтакта при приработке / В.В. Зелинский // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов. Выпуск 1.- Брянск, 2002, С. 41-44.
7. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
8. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

Зелинский Виктор Васильевич

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Тел. 8-(49234) 77-2-82
E-mail: selvik46@yandex.ru

V.V. ZELINSKIY

TRIBOMECHANIC OF PLASTIC CONTACT FOR HARDENING SHAFTS BY ROLL FORMING

For surface hardening shaft by roll forming studied the reasons of defects formation in the place of deformation. With a view to improving the quality of the surface layer by the technological way proposed a conical shape of the roll forming roller, providing homogeneous deformation. The factor of friction roller on the surface was introduced. Mathematical modeling of deformation interaction of surfaces in the conditions of combined loading of the normal and tangential loads with using the theory of plasticity is held. Theoretical calculations showed substantial conformity with the experimental results, which points to the possibility of technology optimization and forecasting of hardening parameters.

Keywords: deformation, surface, strain, hardening, yield strength, introduction, friction.

BIBLIOGRAPHY

1. Smeljanskij, V.M. Mehanika uprochnenija detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem / V.M. Smeljanskij. – М.: Mashinostroenie, 2002. – 300 s.
2. Makushok, E.M. Osnovnye napravlenija razvitiya mehaniki trenija / E.M. Makushok // Trenie i iznos, №3, T.16, 1995, S. 416 – 427.
3. Shkol'nik, L.M. Tehnologija i prispособlenija dlja uprochnenija i otdelki detalej nakatyvanijem / L.M. Shkol'nik, V.I. Shahov. – М.: Mashinostroenie, 1964. – 184 s.
4. Dzhonson U., Mellor P.B. Teorija plastichnosti dlja inzhenerov. Per. s angl./Per. A.G. Ovchinnikov. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 567 s.
5. Zelinskij, V.V. Uslovie plasticheskogo ravnovesija pri trenii nagruzhennyh poverhnostej / V.V. Zelinskij // Proizvodstvennye tehnologii i kachestvo produkcii: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 25-27 sentjabrja 2001 g. Vladimir / Pod red. prof. V.F. Korosteleva. Moskva «Novye tehnologii», 2001, s. 203-206
6. Zelinskij, V.V. Ustanovlenie svjazi mezhdru parametrami tribokontakta pri prirabotke / V.V. Ze-linskij // Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii. Sbornik nauchnyh trudov. Vypusk 1.- Brjansk, 2002, S. 41-44.
7. Storozhev, M.V. Teorija obrabotki metallov davleniem: uchebnik dlja vuzov. Izd. 4-e, pererab. i dop. / M.V. Storozhev, E.A. Popov. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 423 s.
8. Trenie, iznos i smazka (tribologija i tribotehnika) / A.V. Chichinadze, Je.M. Berliner, Je.D. Braun i dr.; Pod obshh. red. A.V. Chichinadze. – М.: Mashinostroenie, 2003. – 576 s.

Zelinsky Victor Vasiljevich

The Murom institute (branch) of Vladimir state university
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, the professor of faculty « Technology of mechanical engineering »
Tel. 8-(49234) 77-2-82
E-meil: selvik46@yandex.ru

УДК 621.979.132:62-531.6

Т.В. ФЕДОРОВ, К.А. ВОЛОБУЕВ

АНАЛИЗ ЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

Рассмотрен принцип частотного управления асинхронного привода кривошипного пресса. Построена математическая модель кривошипного пресса и его привода, применительно к системе с частотным управлением. Проведено моделирование процесса пробивки и сравнение параметров системы при варьировании частоты и напряжения.

Ключевые слова: математическая модель; частотное управление; кривошипный пресс.

20-30 лет назад в стране выпускалось рекордное, по сравнению с другими странами, количество кузнечно-прессовых машин (КПМ). Кроме того много КПМ закупалось за рубежом. Немалую часть из них составляют кривошипные пресса, получившие широкое распространение в области приборостроения и машиностроения в связи с высоким быстродействием, максимальной силой в конце рабочего хода, простотой настройки и обслуживания.

Современные модели кривошипных прессов отличаются от своих предшественников наличием современной системы управления и регулировки, возможностью интеграции (встраивания) в систему с комплексной автоматизацией (автоматические участки и линии).

Логичным является вопрос о модернизации имеющегося оборудования по пути установки современных систем управления на базе существующих на рынке модулей и систем. Основное направление модернизации кривошипного пресса затрагивает управление параметрами главного привода моментом и скоростью вращения, т.к. все параметры технологического режима работы тесно с ними связаны посредством кинематической схемы, кроме того, временем срабатывания и моментом на муфте и тормозе.

Так как, электроприводы потребляют до 70 % вырабатываемой электроэнергии, наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов для управления технологическими процессами, что в сочетании с возможностями автоматизации может обеспечить оптимальное использование электроэнергии и других ресурсов. [1]

Наиболее существенная экономия энергии возможна при создании системы управления на основе частотного преобразователя. Управляя частотой напряжения можно как уменьшить, так и увеличить скорость вращения двигателя, а значит изменять накопленную энергию без изменения в самом оборудовании, например, уменьшить энергопотребление при операциях, не требующих номинальной мощности пресса, либо, обеспечить возможность штамповки более твердых и толстых заготовок.

Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

при неизменном числе пар полюсов p изменять угловую скорость магнитного поля статора ω_0 .

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью.

Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики.

Для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение.

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки M_c . При постоянном моменте нагрузки $M_c = const$ напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = const.$$

С точки зрения теории автоматического управления кривошипный пресс практически весь состоит из нелинейных (неудобных) элементов при анализе и синтезе САУ:

1. Электродвигатель (нелинейная механическая характеристика).
2. Ременная передача (возможность проскальзывания).
3. Муфта (релейная функция включения).
4. Кривошипный механизм.
5. Функция силы от перемещения, как реакция на деформацию заготовки.

Математическая модель кривошипного пресса состоит из двух частей: модели электродвигателя и собственно самой модели пресса. Рассмотрим поочередно эти.

В рамках общепринятых допущений (о симметричности обмоток статора, гладкости поверхностей статора и ротора, линейности кривой намагничивания, отсутствии потерь на гистерезис и вихревые токи и синусоидальности напряжений и токов) система уравнений, описывающих движение асинхронного электродвигателя при частотном управлении, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{1\alpha} = u_{1\alpha} - \frac{\psi_{1\alpha}}{\Delta \cdot T_1} + \omega_0 \cdot \psi_{1\beta} + k_2 \cdot \frac{\psi_{2\alpha}}{\Delta \cdot T_1}; \\ \dot{\psi}_{1\beta} = u_{1\beta} - \frac{\psi_{1\beta}}{\Delta \cdot T_1} + \omega_0 \cdot \psi_{1\alpha} + k_2 \cdot \frac{\psi_{2\beta}}{\Delta \cdot T_1}; \\ \dot{\psi}_{1\alpha} = -\frac{\psi_{2\alpha}}{\Delta \cdot T_2} + \omega_r \cdot \psi_{2\beta} + k_1 \cdot \frac{\psi_{1\alpha}}{\Delta \cdot T_2}; \\ \dot{\psi}_{1\beta} = -\frac{\psi_{2\beta}}{\Delta \cdot T_2} + \omega_r \cdot \psi_{2\alpha} + k_1 \cdot \frac{\psi_{1\beta}}{\Delta \cdot T_2}; \end{cases} \quad (1)$$

где $\psi_{1\alpha}$ и $\psi_{1\beta}$ - проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат $\alpha - \beta$, вращающейся со скоростью магнитного поля;

$u_{1\alpha}$ и $u_{1\beta}$ - проекции изображающего вектора напряжения в той же системе координат;

$\psi_{2\alpha}$ и $\psi_{2\beta}$ - соответствующие проекции вектора потокосцепления ротора;

$$\Delta = 1 - \frac{L_0^2}{L_1 \cdot L_2}; \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} \text{ и } T_2 = \frac{L_2}{R_2} \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{L_0}{L_1} \text{ и } k_2 = \frac{L_0}{L_2} \quad (4)$$

L_1 и R_1 - полная индуктивность и активное сопротивление цепи статора;

L_2 и R_2 - приведенные полная индуктивность и активное сопротивление цепи ротора;

$$L_1 = L_0 + L_{q1} \text{ и } L_2 = L_0 + L_{q2}, \quad (5)$$

где L_{q1} и L_{q2} - индуктивность рассеяния фазы статора и ротора соответственно;

L_0 - взаимная индуктивность;

ω_0 - угловая скорость вращения магнитного поля;

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (6)$$

ω_r - угловая скорость вращения ротора;

$$\omega_r = \omega_0 - \omega \cdot p \quad (7)$$

ω – текущее значение угловой скорости вала двигателя;
 p – число пар полюсов электродвигателя;

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = u_{1x} \cdot \cos(\Theta) + u_{1y} \cdot \sin(\Theta); \\ u_{1\beta} = u_{1y} \cdot \cos(\Theta) - u_{1x} \cdot \sin(\Theta); \end{cases} \quad (8)$$

где Θ - угол поворота системы $\alpha - \beta$ в электрическом пространстве,

$$\Theta = \int \omega_0 dt; \quad (9)$$

u_{1x}, u_{1y} – проекции напряжение в координатах $x - y$;

$$\begin{cases} u_{1x} = 2 \cdot (U_{1a} - 0,5 \cdot \frac{U_{1b} + U_{1c}}{3}); \\ u_{1y} = \frac{U_{1b} - U_{1c}}{\sqrt{3}}; \end{cases} \quad (10)$$

где U_{1a}, U_{1b}, U_{1c} – фазные напряжения питания;

$$\begin{cases} U_{1a} = U_{1\max} \cdot \sin(\Theta); \\ U_{1b} = U_{1\max} \cdot \sin(\Theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}); \\ U_{1c} = U_{1\max} \cdot \sin(\Theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}); \end{cases} \quad (11)$$

где $U_{1\max}$ – амплитудное значение входного напряжения;

$$U_{1\max} = U_1 \cdot \sqrt{2}, \quad (12)$$

где U_1 – входное значение напряжения.

Электромагнитный момент создаваемый двигателем равен:

$$M_э = 1,5 \cdot p \cdot k_1 \cdot \frac{\psi_{2\alpha} \cdot \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}}{\Delta \cdot L_2} \quad (13)$$

На основе этих уравнений построим модель двигателя в ПК МВТУ (рис. 1).

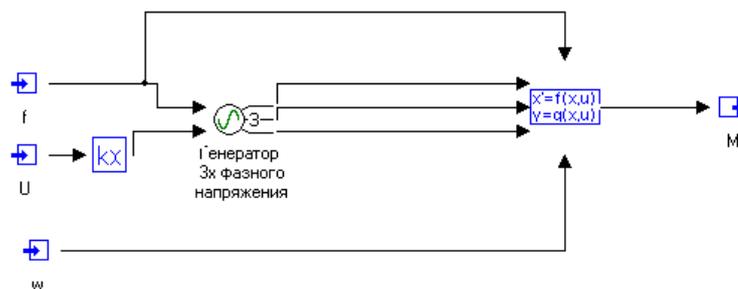


Рисунок 1 – Модель двигателя в ПК МВТУ

Входы f, U и w – соответственно частота напряжения, его значение и текущее значение угловой скорости двигателя. Блок kx умножает значение напряжения на $\sqrt{2}$, тем самым получаем амплитудное значение. Генератор трехфазного напряжение образует фазные токи согласно системе уравнений (11).

Зададимся начальными значениями: $\Theta = 0$ рад, $\psi_{1\alpha} = 0, \psi_{1\beta} = 0, \psi_{2\alpha} = 0, \psi_{2\beta} = 0, U = 0$ В, $f = 50$ Гц, $L_{q1} = 0,11, R_1 = 0,11, L_{q2} = 0,21, R_2 = 0,088, L_0 = 1,8$. Т.к. значение сопротивлений и индуктивностей указаны в относительных единицах, то необходимо воспользоваться формулами перевода:

$$r_1 = \frac{R_1 \cdot U_1}{I_1}, \text{ Ом};$$

$$r_2 = \frac{R_2 \cdot U_1}{I_1}, \text{ Ом};$$

$$l_1 = \frac{L_1 \cdot U_1}{I_1 \cdot \omega_0}, \text{ Гн};$$

$$l_2 = \frac{L_2 \cdot U_1}{I_1 \cdot \omega_0}, \text{ Гн};$$

$$l_0 = \frac{L_0 \cdot U_1}{I_1 \cdot \omega_0}, \text{ Гн};$$

(14)

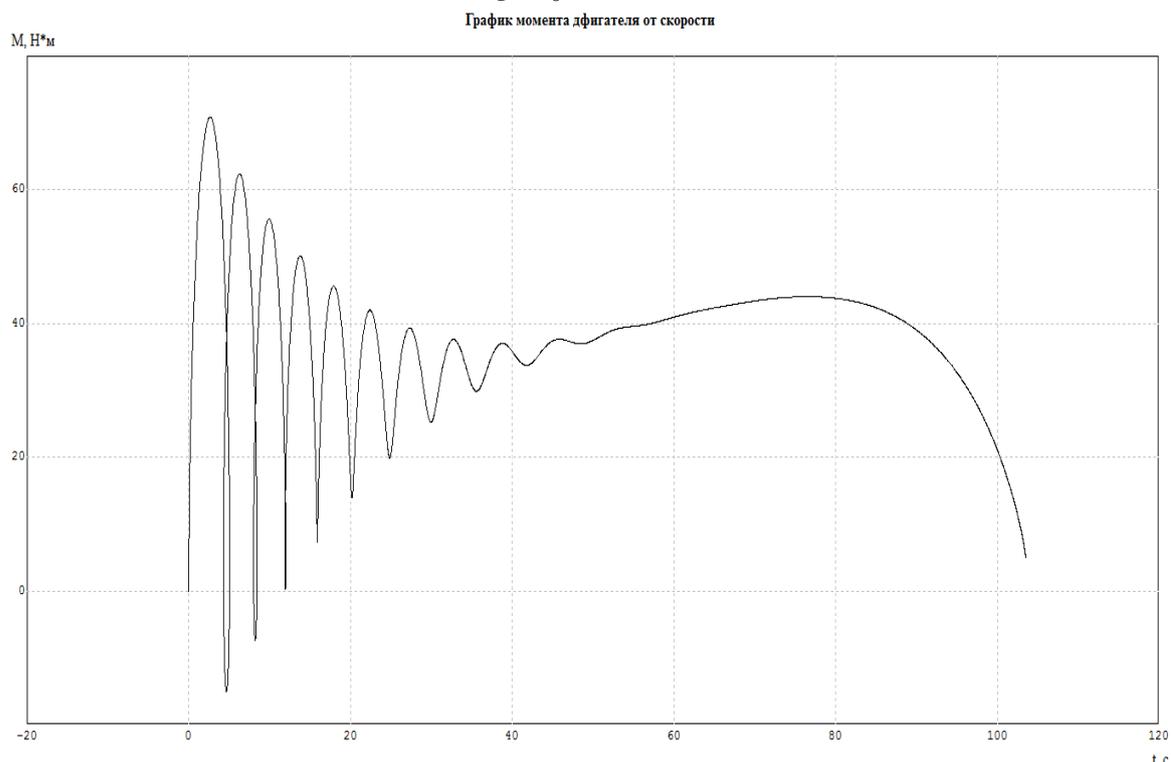


Рисунок 2 – Механическая характеристика двигателя

Построив модель управляемого асинхронного двигателя можно разработать модель кривошипного пресса (15) со следующими допущениями:

- 1) Считаем силу натяжения ремня клиноременной передачи постоянной (не учитывается проскальзывание).
- 2) Допущение о постоянной длине звеньев (звенья не упруги, шарниры без зазора).
- 3) Не учитывается инерционность шатуна и ползуна в силу их незначительности по сравнению со значением приведенных моментов инерции двигателя, маховика и вала.
- 4) Мгновенное включение и выключение муфты.
- 5) Принята кулоновская модель трения в опорах.
- 6) Сила необходимая для совершения рабочей операции задана как функция от перемещения.
- 7) Не учитывается воздействие силы тяжести.

$$J_{\partial\partial} \cdot \frac{d\omega_{\partial\partial}}{dt} = M_{\partial\partial} - M_{mp1} \cdot \text{sign}(\omega_{\partial\partial}) - \frac{J_M + J_\partial \cdot R}{k \cdot u} \cdot \frac{d\omega_{\partial\partial}}{dt} + M_{mp2} \cdot \text{sign}\left(\frac{\omega_{\partial\partial}}{u}\right) + M_{np}, \quad (15)$$

где $J_{\partial\partial}$, J_M , J_∂ – моменты инерции двигателя, маховика и вала соответственно;

$\omega_{\partial\partial}$ – угловая скорость вращения двигателя;

$M_{\partial\partial}$ – вращающий момент двигателя;

M_{mp1} , M_{mp2} – моменты трения в парах клиноременная передача и шкив, маховик и вал при отключенной муфте или вал и станина при включенной;

$sign(\omega_{\partial\theta})$ – переменная, знак которой зависит от направления силы трения;

R – переменная, принимающая значение 1, если муфта включена и 0, если отключена;

k – коэффициент трансформации,

$$k = \eta \cdot u, \quad (16)$$

где η – КПД клиноременной передачи;

u – передаточное число,

$$u = \frac{d_2}{d_1}, \quad (17)$$

где d_1 , d_2 – диаметры шкива и маховика соответственно;

M_{np} – приведенный момент, равный противодействию процесса вырубке-пробивки;

$$M_{np} = P \cdot [e \cdot \sin(\pi - \alpha) + 0,5 \cdot \lambda \cdot \sin(2 \cdot (\pi - \alpha)) + f_{mp} \cdot ((1 + \lambda \cdot \cos(\pi - \alpha)) \cdot r_a) + \lambda \cdot r_b \cdot \cos(\pi - \alpha)], \quad (18)$$

где P – сила, противодействующая деформации при вырубке-пробивке.

Если $\alpha > \pi$, то считаем $P = 0$, т.к. ползун движется вверх и совершает холостой ход.

$$P = k_1 \cdot l \cdot h_m \cdot \sigma_{cp}^x, \quad (19)$$

при $x < h_k$ и

$$P = P_0 + a \cdot \left(\frac{h_m - x}{h_m - h_k} \right)^b, \quad (20)$$

при $x \geq h_k$,

где k_1 – коэффициент, учитывающий затупление инструмента, колебание толщины и механических свойств материала;

l – периметр вырубяемого материала,

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r, \quad (21)$$

где r – радиус заготовки;

h_m – толщина вырубяемого материала;

σ_{cp}^x – текущее сопротивление срезу,

$$\sigma_{cp}^x = \frac{S_k}{2 - 0,95 \cdot \psi_k} \cdot \frac{\psi}{\psi_k} \cdot \left(1,03 - \frac{0,9 \cdot \psi_k}{1,9 - \psi} \right), \quad (22)$$

где ψ_k – относительное сужение при стандартных испытаниях на разрыв;

$$S_k = \sigma_\theta \cdot (0,8 + 2,06 \cdot \psi_k), \quad (23)$$

σ_θ – предел прочности металла при растяжении;

x – перемещение инструмента при разделительных операциях;

$$x = L \cdot (\sqrt{1 - (\lambda \cdot \sin(\alpha))^2} - 1 + \lambda \cdot (1 - \cos(\alpha))), \quad (24)$$

α – угол поворота вала;

$$\lambda = \frac{e}{L}, \quad (25)$$

где e – эксцентриситет;

L – длина шатуна;

ψ – относительное сужение поперечного сечения при вырубке-пробивке,

$$\psi = \frac{x}{h_m}; \quad (26)$$

h_m – перемещение пуансона до начала разрушения металла при вырубке,

$$h_k = h_m \cdot \left(\frac{0,9 \cdot \psi_k}{1,9 - \psi_k} \right); \quad (27)$$

P_0 – усилие проталкивания пуансона после вырубки;

$$a = P_{\max} - P_0, \quad (28)$$

где P_{\max} – максимальная сила, при $x = h_k$;

$$b = \frac{1 - k_2}{k_2}, \quad (29)$$

где k_2 – коэффициент заполнения графика рабочей нагрузки на участке скола;

f_{mp} – коэффициент трения в опорах;

r_a, r_b – радиусы трения в парах вал – шатун, шатун – ползун соответственно.

Построим с помощью блоков модель кривошипного пресса в ПК МВТУ (рис. 3).

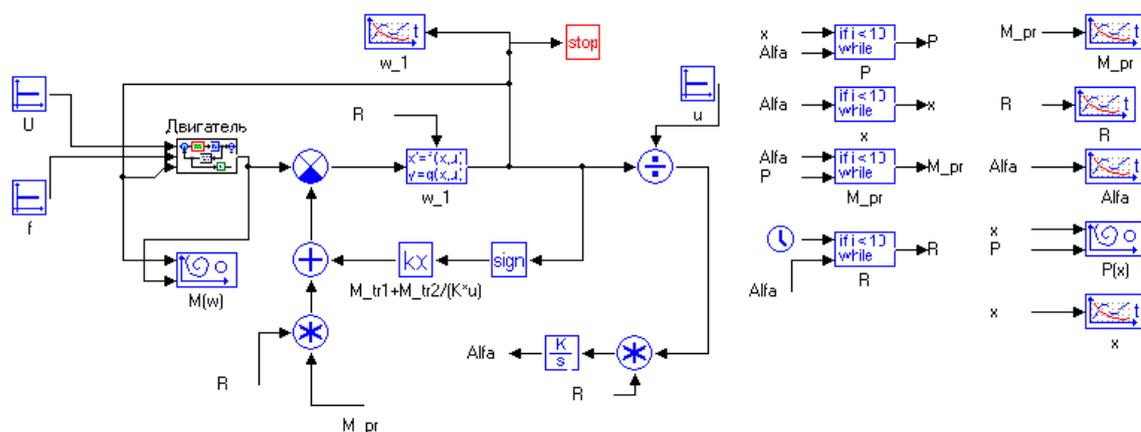


Рисунок 3 – Модель кривошипного пресса в ПК МВТУ

Численные значения коэффициентов и начальные значения переменных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение параметров

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$J_{\partial\partial}$	0,0079 кг·м ²	η	0,93	k_2	0,2
J_m	1,3 кг·м ²	d_1	0,13 м	e	0,004 м
J_{∂}	0,0031 кг·м ²	d_2	0,46 м	L	0,14 м
$\omega_{\partial\partial}$	0 м/с	k_1	1,25	f_{mp}	0,12
U	380 В	r	0,0004 м	r_a	0,03 м
f	50 Гц	h_m	0,001 м	r_b	0,015 м
M_{mp1}	3,9 Н·м	ψ_k	0,55	t	1 с
M_{mp2}	13,8 Н·м	σ_{∂}	392·10 ⁶ Па	P_0	371,723 Н

Зададимся временем интегрирования 1,7 с. Графики изменения значений параметров при моделировании разделительной операции представлены на рисунке 4.

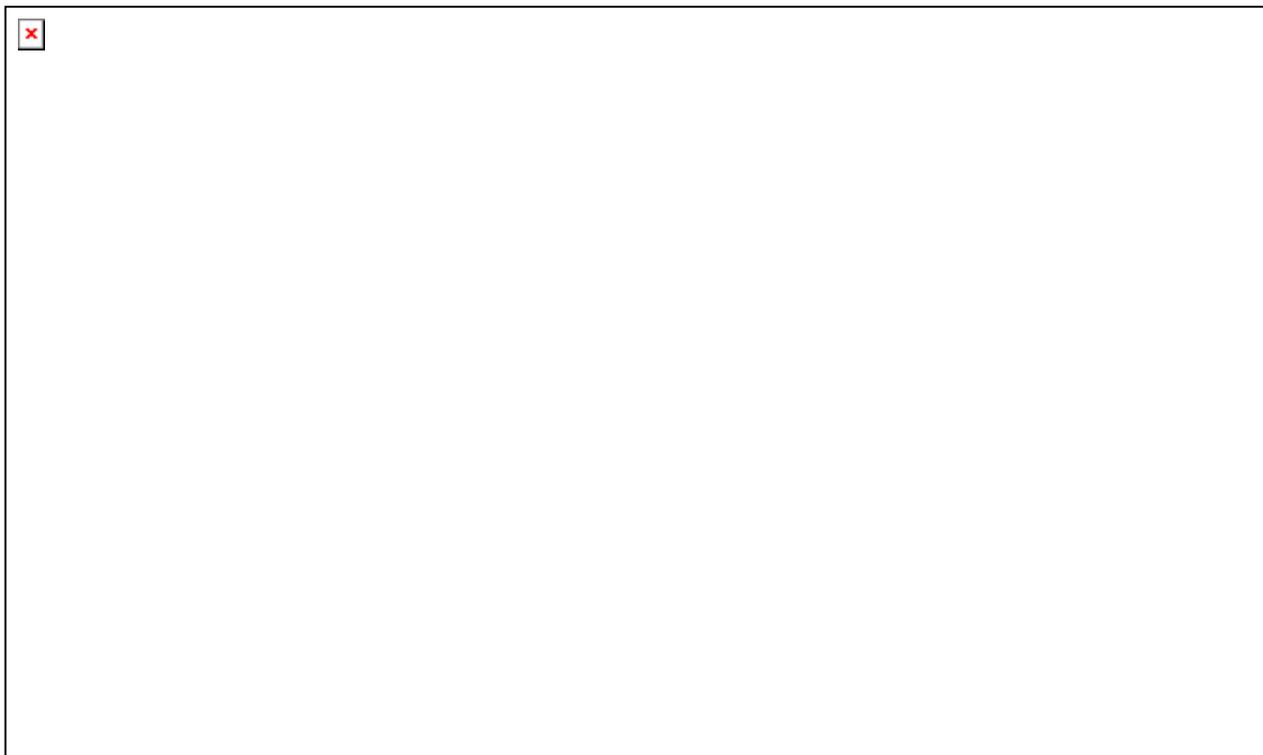


Рисунок 4 –Изменение параметров прессы

*w(t) – график изменения скорости вращения асинхронного двигателя;
 P(x) – график изменения силы сопротивления деформации при пробивке;
 R – график включения муфты; x(t) – график перемещения ползуна;
 M(t)- график изменения приведенного момента*

Диапазон регулирования частоты для асинхронных двигателей составляет от 25 до 75 Гц, т.к. при частоте меньше 25 начинается перегрев двигателя вследствие медленного вращения (можно задать частоту меньшую 25 Гц, но потребуются активное охлаждение двигателя) и большей 75 начинается проскальзывание магнитного поля. Напряжение нельзя повышать больше номинального (380 В), т.к. обмотка двигателя рассчитана на него и при его повышении электродвигатель сгорит.

Помня об этом ограничении, зададимся входными значениями $U=380$ В, $f=75$ Гц и будем понижать частоту с шагом в 5 Гц.

Как видно из рисунка 3.2.8 при скалярном управлении незначительно увеличивается время разгона двигателя (0,2-0,3 с) при этом при повышении частоты питаемого напряжения повышается номинальная скорость электродвигателя, а замедление при пробивке уменьшается, и двигатель быстрее вновь выходит на номинальную скорость вращения. Исходя из этого, при скалярном управлении можно добиться увеличения производительности путем сокращения времени между технологическими циклами и изготавливать детали из более толстых и твердых заготовок.

Анализируя графики на рисунке 6 можно сделать вывод, что если технологическая операция не требует полной мощности от электродвигателя, что уменьшая частоту и напряжение можно добиться экономии электроэнергии в пределах 20-30%.

Помимо задания частоты и напряжения частотный преобразователь имеет функцию плавного пуска и тормоза, ограничения значения тока и ряд других дополнительных функций упрощающих управление двигателем и расширяющих его возможности.

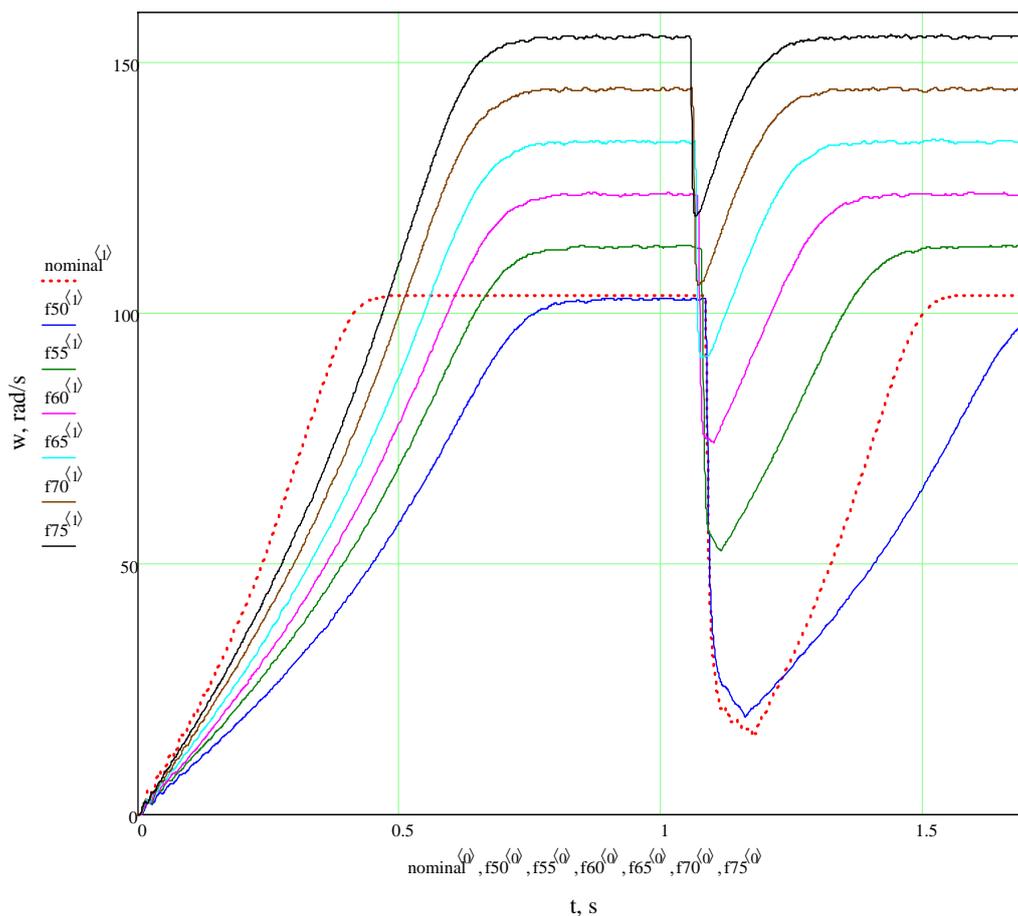


Рисунок 5 – Сравнение угловой скорости двигателя при различных входных воздействиях

На рисунке 6 представлены графики потребляемой мощности при различных входных воздействиях.

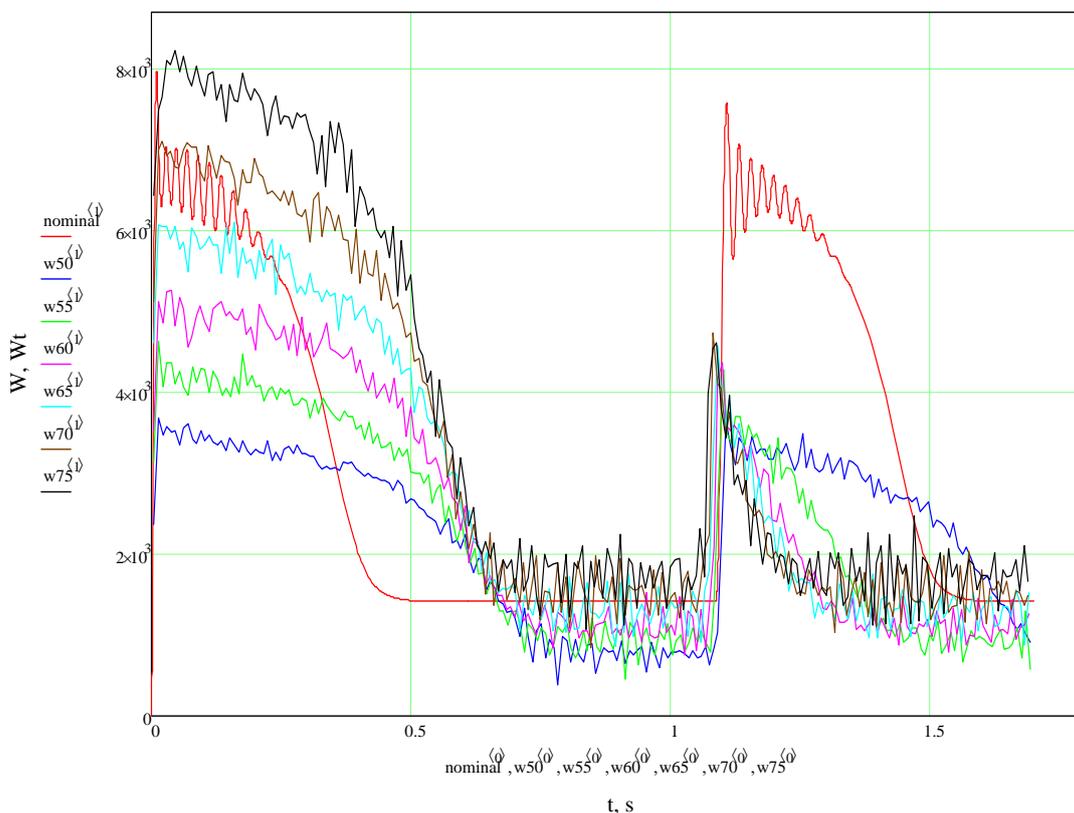


Рисунок 6 – Графики изменения потребляемой мощности при различных входных воздействиях

Следует также отметить, что решение задачи создания такой системы управления позволяет не только сохранить электроэнергию, но и увеличить срок службы оборудования, уменьшить технологические паузы, а также увеличить мощность электродвигателя при определенных операциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов., В.Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
2. Свистунов, В.Е. Кузнечно-штамповочное оборудование. Кривошипные прессы: учебное пособие / В.Е. Свистунов. – М.: МГИУ, 2008. – 698 с.
3. Бочаров, Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю.А. Бочаров. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 480 с.
4. Гуков, Э.А. Автоматизированный электропривод. : метод. указания. Э.А. Гуков, Т.В. Федоров, С.Н. Злобин, Г.П. Короткий, К.И. Капырин. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2012. – 55 с.
5. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

Федоров Тимофей Васильевич

Государственный университет – учебно-научно-производственный-комплекс, г. Орел
Доцент, кандидат технических наук
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

Волобуев Кирилл Андрианович

Государственный университет – учебно-научно-производственный-комплекс, г. Орел
Студент гр. 51-АП
E-mail: kirillvolobuev@yandex.ru

T.V. FEDOROV, K.A. VOLOBUEV

ANALYSIS OF THE FREQUENCY OF THE SYSTEM REGULATION OF THE CRANK PRESS

The drive frequency control of crank press principle is examined. The mathematical crank press model and its drive applicable to the frequency controlled system are constructed. The punching process is simulated, and the options of the system by different input influences are compared.

Keywords: *mathematical model; frequency control; crank press.*

BIBLIOGRAPHY

1. Braslavskij, I.Ja. Jenergoberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod / I.Ja. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov., V.N. Poljakov. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. – 256 с.
2. Svistunov, V.E. Kuznechno-shtampovocnoe oborudovanie. Krivoshipnye pressy: uchebnoe posobie / V.E. Svistunov. – М.: MGIU, 2008. – 698 с.
3. Bocharov, Ju.A. Kuznechno-shtampovocnoe oborudovanie: uchebnik dlja stud. vysh. ucheb. zavedenij / Ju.A. Bocharov. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2008. – 480 с.
4. Gukov, Je.A. Avtomatizirovannyj jelektroprivod. : metod. ukazanija. Je.A. Gukov, T.V. Fedorov, S.N. Zlobin, G.P. Korotkij, K.I. Kapyrin. – Орел: FGBOU VPO «Gosuniversitet-UNPK», 2012. – 55 с.
5. Braslavskij, I.Ja. Jenergoberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod / I.Ja. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Poljakov. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. – 256 с.

Fedorov Timofey Vasilevich

State University – Education-Science-Production Complex, Orel
Docent, Candidate of Technical Science
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

Volobuev Kirill Andrianovich

State University – Education-Science-Production Complex, Orel
Student gr. 51-АП
E-mail: kirillvolobuev@yandex.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 687.054.3.24

УДК 621.0

А.И. ЖАВОРОНКОВ, А.П. ЧЕРЕПЕНЬКО, А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО

ПЕРЕКОС ТРАВЕРСЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ ПРЕССА

Повышение работоспособности пресса и повышения качества вырубания возможно за счет снижения перекоса траверсы. Особенностью гидросистемы пресса являются одним из факторов, существенно влияющим на величину перекоса траверсы при несимметричном приложении нагрузки. Для изучения подобных явлений проведен анализ оборудования в процессе его эксплуатации на предприятиях бытового обслуживания.

Ключевые слова: пресс, траверса, гидравлика, перекося, нагрузка.

Одним из путей, обеспечивающим выпуск продукции стабильно высокого качества, является повышение долговечности, эксплуатационного ресурса машин, что отражается и на стабильности качества обрабатываемого материала. На участках раскроя материалов предприятий легкой промышленности и бытового обслуживания широко распространены вырубные прессы траверсного типа, имеющие механический или гидравлический привод и характеризующиеся неодинаковыми по уровню технологическими нагрузками, технологические аспекты этого процесса подробно рассмотрены в работе [1].

Условия технологического нагружения определяет процесс взаимодействия резака с обрабатываемым полуфабрикатом и, как следствие, обеспечивающий выход продукции определенного качества, что достаточно подробно рассматривалось ранее [2,3]. Кроме того, качество процесса вырубания деталей и производительность процесса зависят от условий взаимодействия резака не только с вырубным материалом, но и с вырубной плитой, на которой раскладывается вырубный материал [3]. Процесс вырубания деталей галантереи, одежды и обуви на прессах легкого и тяжелого типа отличается некоторыми специфическими особенностями. Поэтому представляется важным определить динамические нагрузки на прессах, имеющих в качестве подвижного элемента ударник или траверсу. Особенно сложные динамические условия возникают при работе пресса траверсного типа, который имеет большую длину (пролет) траверсы и вследствие этого значительный эксцентриситет приложения технологической нагрузки при крайних положениях резака [4].

В результате длительной эксплуатации таких прессов их техническое состояние ухудшается за счет постепенного изнашивания поверхностей деталей. Около 90% их отказов происходит вследствие потери работоспособности и выхода из строя деталей, а расходы на ремонт деталей узлов машин и агрегатов предприятий легкой промышленности, коммунального хозяйства и бытового обслуживания, оборудования прачечных и машин химчистки по стране постоянно увеличиваются. В результате неизбежного изнашивания деталей снижается производительность оборудования, а также качество выпускаемой продукции и услуг, увеличиваются затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования. Перекося траверсы при износе деталей существенно возрастает, что, в свою очередь, является причиной роста динамического нагружения пресса и резкого интенсифицирования количество отказов. Причем качество вырубания при этом также резко падает [3].

Для изучения подобных явлений проведен анализ оборудования в процессе его эксплуатации на предприятиях бытового обслуживания. Как показывают производственные наблюдения и сбор статистического материала по предприятиям сферы быта, имеющих соответствующее оборудование, значительное число отказов прессов связано с условиями их технологического нагружения. Последнее характеризуется тем, что вырубание деталей про-

исходит при асимметричном нагружении рабочих органов пресса. Вырубаемый материал раскладывается по всей площади рабочего стола (вырубной плиты) и постепенно раскраивается на отдельные детали за счет соответствующего перемещения резака. Одной из причин, вызывающих снижение технического уровня траверсных прессов, следует считать перекося траверсы в процессе вырубаания деталей, что вызывает либо недорубание деталей, либо повышенное внедрение резака в плиту, резко интенсифицирующее ее износ.

Проведено изучение этой проблемы с точки зрения жесткости механической системы и функционирования элементов гидросистемы. Экспериментальные исследования показали, что перекося траверсы пресса ПВГ 18 - 1600, обусловленный несимметричным приложением нагрузки, податливостью гидросистемы, наличием в рабочей жидкости нерастворённого воздуха, утечек масла в скалке и дозаторе, может быть снижен на 30%.

Показатели надёжности, полученные на основе подконтрольной эксплуатации прессов ПВГ 18 - 1600, в среднем для одного пресса составляют: наработка на отказ - 343,5 часа; среднее время восстановления - 1,08 часа, коэффициент готовности производства - 0,998. Оценка количественных показателей надёжности свидетельствует о значительном резерве по повышению надёжности пресса.

Снижение перекося достигается, в частности, путём использования вместо металлических полимерных вырубных плит, когда при внедрении резака в материал плиты резко снижается нагружение элементов гидросистемы пресса. При этом давление в магистрали насос - дозатор остаётся относительно стабильным при любом положении резака.

В процессе выполнения эксперимента технологическое нагружение пресса осуществлялось путём разрубания жёстких кож. Резак поочередно помещался в одной из пяти ланшафтных точек вырубаемого материала, что требовало его смещения по рабочему столу от центрального положения к крайнему левому и правому. При этом фиксировались следующие параметры:

- давление в магистрали "насос - дозатор";
- давление в верхней и нижней полости дозатора;
- перекося траверсы при её рабочем ходе;
- момент касания траверсой резака.

Общая картина нагружения пресса приведена на рис.1 На шкале абсцисс приведены значения точек в которых устанавливается резак на рабочем столе, начиная с крайне левого до крайне правого положения, где нулевое значение соответствует среднему положению по оси сим^{МПа} МПа ли пресса.

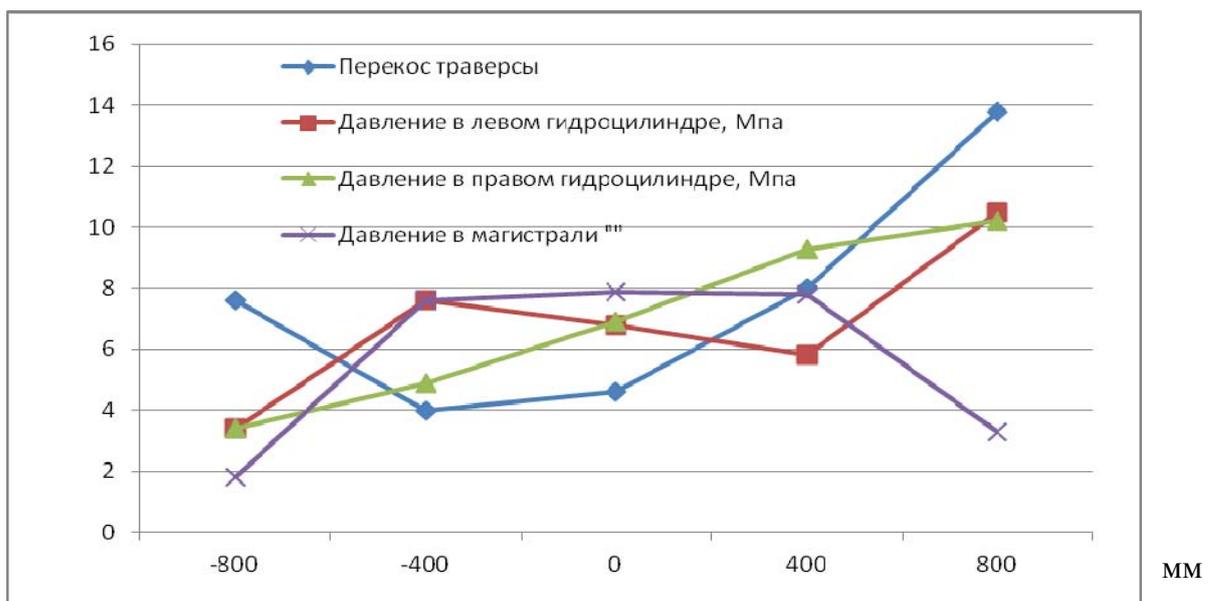


Рисунок 1 – Результаты эксперимента по определению перекося траверсы (в мм)

Как показывают графики (рис. 1) изменение положение резака от крайне левого до крайне правого на рабочем столе существенно изменяет значения всех параметров рабочего процесса. Причем конструктивные характеристики гидросистемы пресса (разная длина левой и правой магистралей, отличия в емкостях из которых происходит подача масла в гидроцилиндры и т.д.) приводят к тому, что даже при центральном положении резака этот перекося имеет место. Изучение работы группы прессов показало влияние индивидуальных особенностей каждого пресса на значения каждого измеряемого параметра. При этом большое значение имеет износ пресса и его настройка.

На рисунке 2 приводятся значения перекося траверсы при указанных положениях резака в сравнении с давлением в одном из гидроцилиндров.

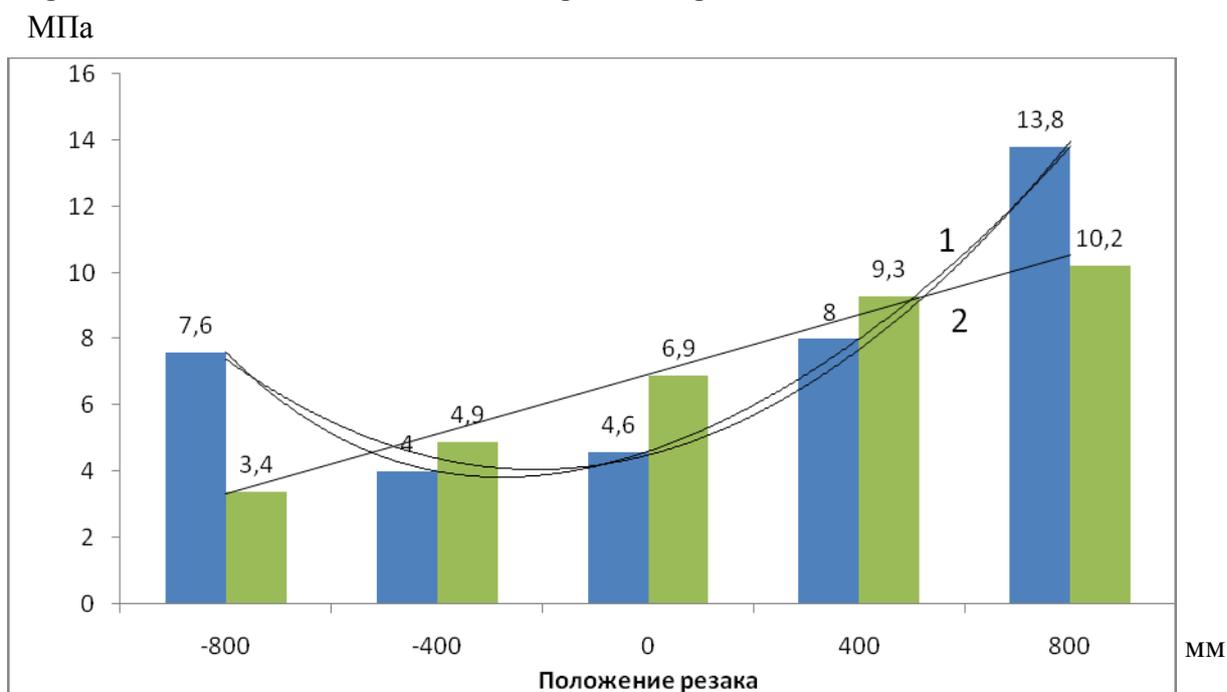


Рисунок 2 – Перекося траверсы – 1 (в мм) и изменение давления в правом гидроцилиндре – 2 (МПа) при разных положениях резака

Перекося траверсы может быть аппроксимирован полиномиальной функцией второй или третьей степени, как это показано на графиках, хотя различия при этом совершенно незначительны. Причем нулевого перекося траверсы при таких перемещениях резака не достигает и это удалось в данном эксперименте только путем постепенного перемещения резака в диапазоне 250-300 мм слева от оси симметрии пресса. Хотя для практики этот вывод не имеет существенного значения, так как вырубание материала рекомендуется производить по всей площади рабочего стола. Этим обеспечивается равномерный износ вырубной плиты и более высокий выход готовых изделий при работе с натуральными материалами для которых характерна сложная конфигурация.

Если сравнивать результаты таблицы, где приведены значения испытаний с полиэтиленовыми вырубными плитами, то можно видеть, что введение полимерных вырубных плит по сравнению с металлическими обеспечивают лучшие условия работы вырубного пресса, хотя и свойства самого полимера также изменяет нагрузки пресса.

Таблица 1 – Перекося траверсы при использовании полиэтиленовых вырубных плит

Смещение резака от центра	400 мм	800 мм
Давление в левом гидроцилиндре, МПа	7,0/6,3	7,9/6,0
Давление в правом гидроцилиндре, МПа	1,8/6,0	3,8/7,6
Давление в магистрали «насос-дозатор», МПа	6,0/6,1	5,1/5,9
Перекося траверсы, мм	3,6/4,2	4,0/7,8

Примечание: расположение резака слева/справа

ВЫВОД

Следует отметить, что хотя использование различных полимеров может изменять перекос траверсы, общая тенденция в изменении параметров процесса сохраняется [5].

Таким образом, проведенные исследования позволили установить основные тенденции совершенствования вырубных прессов, широко применяемых на предприятиях по выпуску галантереи, обуви и швейных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аннаев, Г.Н. Дифференциальное уравнение движения элементов вырубного гидравлического пресса для исследования на ЭВМ / Г.Н. Аннаев, В.Г. Владыкин, В.А. Иванов, В.В. Карамышкин // Известия АН ТССР. Серия физико-технических химических и геологических наук. №4.1987 – С.14-20.
2. Гараз, Т.В. Защита от вибраций и шума при работе на вырубных прессах / Т.В. Гараз, А.В. Максимов // Материалы 1 Международного конгресса MedBeautyManagement М. 2007
3. Гараз, Т.В. Определение вибрационных параметров вырубных прессов / Т.В. Гараз // Наука и образование. Межвуз. сб. н. трудов. Вып.3 М.: МГУДТ, 2006. – С.128-149
4. Иванов, В.А. Анализ применения различных полимерных плит при вырубании деталей обуви / В.А. Иванов, В.Г. Шуметов, Л.В. Босько, И.А. Шенбель // Кожевенно-обувная промышленность. №7. – 1987. – С. 44-45
5. Лукина, Л.А. Оценка альтернативных технических решений с помощью иерархических структур / Л.А. Лукина, Т.В. Гараз, М.В. Тимошенко // Материалы 1 Международного конгресса «MedBeautyManagement. М. 2007. 0,60 п.л.

Жаворонков Александр Иванович

ФГБОУ ВПО Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса
г.Шахты, Ростовской области
Доктор технических наук, профессор
E-mail: arkan-68@mail.ru

Черепенько Анатолий Павлович

ФГБОУ ВПО Орловский государственный университет г.Орел
Доктор технических наук, профессор
E-mail: arkan-68@mail.ru

Черепенько Аркадий Анатольевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК г.Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры Тми КТИ
E-mail: arkan-68@mail.ru

A.I. ZHAVORONKOV, A.P. CHEREPENKO, A.A. CHEREPENKO

SAG IN TRAVERSES ASYMMETRICALLY LOADING PRESS

Increase efficiency and improve the quality of the press cutting out the possibility but by reducing the skew traverse. Feature of the hydraulic press is one of the factors that significantly affect the amount of skew beam with an asymmetric load is applied. In order to study these phenomena analysis of equipment during its operation on consumer services.

Keywords: news, traverse, hydraulics, skewed load.

BIBLIOGRAPHY

1. Annaev, G.N. Differencial'noe uravnenie dvizhenija jelementov vyrubnogo gidravlicheskogo pressa dlja issledovaniija na JeVM / G.N. Annaev, V.G. Vladykin, V.A. Ivanov, V.V. Karamyshkin // Izvestija AN TSSR. Serija fiziiko-tehnicheskikh himicheskikh i geologicheskikh nauk. №4.1987 – S.14-20.
2. Garaz, T.V. Zashhita ot vibracij i shuma pri rabote na vyrubnyh pressah / T.V. Garaz, A.V. Maksimov // Materialy 1 Mezhdunarodnogo kongressa MedBeautyManagement М. 2007
3. Garaz, T.V. Opredelenie vibracionnyh parametrov vyrubnyh pressov / T.V. Garaz // Nauka i obrazovanie. Mezhvuz. sb. n. trudov. Vyp.3 М.: MГУДТ, 2006. – S.128-149

4. Ivanov, V.A. Analiz primeneniya razlichnyh polimernyh plit pri vyrubanii detalej obuvi / V.A. Ivanov, V.G. Shumetov, L.V. Bos'ko, I.A. Shenbel' // Kozhevenno-obuvnaja promyshlennost'. №7. – 1987. – S. 44-45

5. Lukina, L.A. Ocenka al'ternativnyh tehnicheskikh reshenij s pomoshh'ju ierarhicheskikh struktur / L.A. Lukina, T.V. Garaz, M.V. Timoshenko // Materialy 1 Mezhdunarodnogo kongressa «MedBeautyManagement. M. 2007. 0,60 p.l.

Zavoronkov Alexander Ivanovich

VPO South-Russian State University of Economics and Service

Shakhty, Rostov Region

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

Cherepenko Anatoly Pavlovich

VPO Orel State University

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: arkan-68@mail.ru

Cherepenko Arkady Anatolevich

VPO State University - ESPC Orel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of TMIKTI

E-mail: arkan-68@mail.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 679.72+338.1

Е.Ю. СТЕПАНОВА, В.И. МЕЛЬНИКОВ

ИННОВАЦИИ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОМ ХОЛДИНГЕ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ТЕКСТИЛЬНЫХ СТРОП И КОМБИНИРОВАННЫХ КАНАТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАО «ПРОМСТАЛЬ», г. ОРЕЛ)

Дан анализ состояния, проблем инновационного развития экономики страны. Рассмотрены инновации и наукоемкие технологии получения синтетических полипропиленовых нитей, текстильных строп и комбинированных канатов.

Ключевые слова: инновации, инновационное развитие, полипропилен, нить, технология, текстильные стропы, комбинированные канаты.

Задача перехода от сырьевой экономики на инновационный путь развития четко поставлена руководством страны совсем недавно. Но, не смотря на короткий срок, уже много сделано и делается на государственном и региональном уровнях. Наблюдается существенный рост финансирования на эти цели. Расходы федерального бюджета на гражданскую науку за последние 5 лет увеличились в 3 раза. Стали больше финансировать свои инновационные разработки государственные корпорации и компании с государственным участием, которые приняли свои программы инновационного развития. Конечно, не обошлось без административного принуждения к этому со стороны государства.

Однако ситуация в этой области, неоднократно озвученная руководством страны [1-4], была и продолжается оставаться острой. В экономике России по-прежнему доминируют сырьевые отрасли, а уровень инновационной активности отечественных предприятий, а, следовательно, и инновационная составляющая остаются незначительной. Модернизация идет, по мнению многих аналитиков, неудовлетворительными темпами. На исследования и новые разработки предприятия в среднем тратят менее 1 % стоимости выпускаемой продукции. В структуре затрат 60 % составляют машины и оборудование, как правило, предыдущих поколений, но более дешевые, морально устаревшие. Затраты на современные технологии, лицензии и патенты составляют менее 2 % средств. Только 8 % роста национальной экономики РФ достигается за счет высокотехнологичных секторов, в то время как в экономически развитых странах – около 60 процентов. Доля высокотехнологичных производств в реальном секторе российской экономики пока невелика.

Новая экономика формирует и новые рынки продукции, наиболее прибыльным из них является мировой рынок наукоемкой продукции, объемы которого ныне составляют порядка 2,5 - 3 трлн. долларов, а к 2015 году прогнозируется в размере порядка 6 трлн. долларов. Ясно, что этот рынок весьма емкий и перспективный. Пока что доля России на этом рынке по некоторым оценкам составляет 0,3%. В сфере высокотехнологичного обмена мы представлены фактически на рынках военной техники и вооружений.

Разрабатывают и внедряют инновации в нашей стране, по данным статистики, порядка 10 % предприятий, а в европейских странах эта величина колеблется от 40 до 60%.

И, тем не менее, в последние годы появляются и успешно развиваются в различных регионах страны предприятия, успешно применяющие современные наукоемкие технологии и оборудование и выпускающие конкурентоспособную продукцию, пользующуюся спросом, как на российском, так и на мировом рынках. Достаточная правовая база для инновационного роста в стране уже создана.

В этой статье остановимся на опыте работы многофункционального холдинга «ЗАО «Промсталь» (г. Орел), которое с 1994 года является крупнейшим поставщиком канатной продукции, а с 2000 года и производителем комбинированных канатов для рыболовецкого флота. ЗАО Промсталь входит в холдинговую компанию Регион Плюс.

Производственный дивизион ЗАО «Промсталь» включает в себя несколько заводов, выпускающих продукцию, основанную на применении искусственных нитей. Структура производств представлена на рисунке 1.

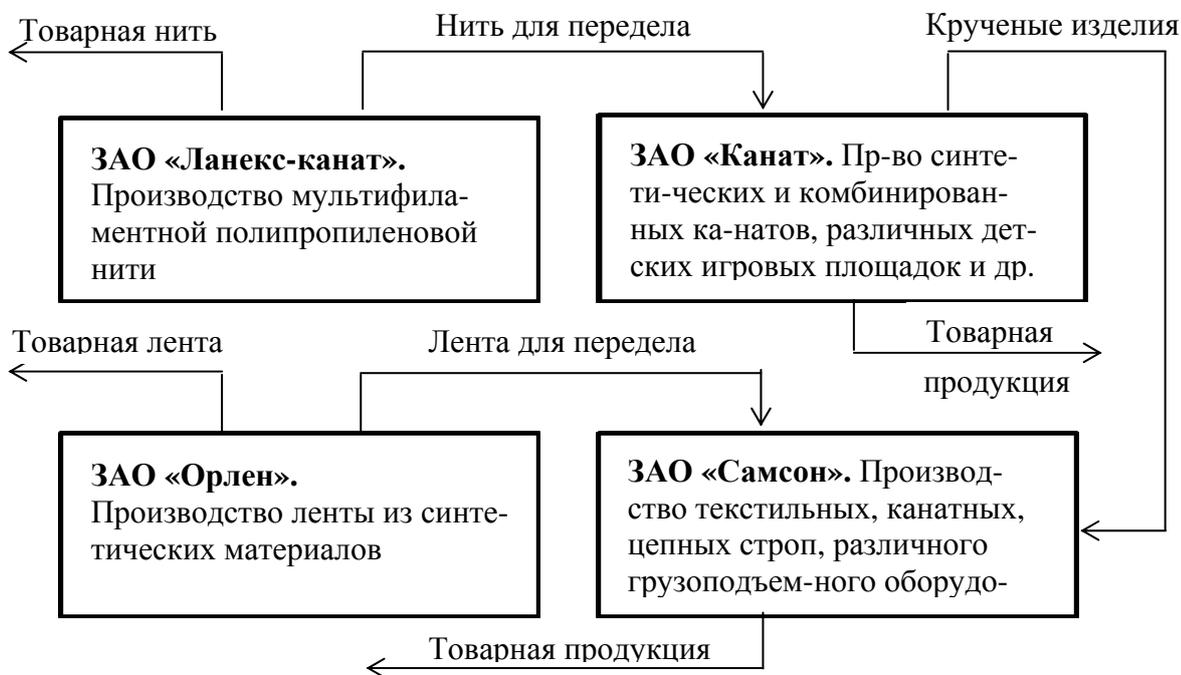


Рисунок 1 - Структура производств производственного дивизиона холдинга «ЗАО «Промсталь»

ЗАО «Ланекс-канат» - производство мультифиламентной полипропиленовой нити.

ЗАО «Орлен» - производство ленты из синтетических материалов. Предприятие является одним из крупнейших производителей технической текстильной ленты в России.

ЗАО «Канат» - производство текстильных, канатных и цепных строп, различного грузоподъемного оборудования и др.

ЗАО «Самсон» является одним из ведущих предприятий в регионе по изготовлению съемных грузозахватных приспособлений (оборудования), в том числе строп: канатных, цепных, текстильных ленточных и круглопрядных грузоподъемностью до 100 тонн.

Созданное в 2000 году, предприятие успело себя зарекомендовать как надежный партнер и производитель высококачественной продукции, способной конкурировать на рынке аналогичной продукции импортного и отечественного производства.

Как видно из рисунка 1, все производства работают по внутреннему замкнутому циклу, что является гарантией высокой мобильности, как в плане сортамента выпускаемой продукции, так и в сроках ее поставки потребителям, гарантированным высоким качеством изделий.

Текстильные стропы по общепризнанному мнению специалистов являются самыми универсальными видами строп [5]. По сравнению с цепными и канатными текстильные стропы имеют множество преимуществ. Они значительно легче строп из металлического каната и не прихотливы в эксплуатации. Минимальный собственный вес и высокая гибкость обеспечивают легкость перемещения самого стропа, его заведения под груз и цепляние к крюку крана, лебедки, таля. Отсутствие торчащих металлических волосков в местах заплетки, поврежденных провололок внешних прядей, острых кромок и заусенец, которые в металлических стропах приводят к травмам, порче спецодежды и рукавиц, обеспечивает безопасность работы персонала. Такие стропы не имеют еще одного недостатка металлических

строп – пружинистости. Благодаря этому они не переплетаются друг с другом, не распрямляются, компактно складываются для транспортировки и хранения, обладают большим числом степеней функциональной свободы по сравнению с аналогами из металла. Канатные металлические стропы при больших нагрузках из-за деформации не могут принимать первоначальный вид, а при заломов и перегибах бракуются и изымаются из обращения. Текстильные же стропы быстро восстанавливают свою форму благодаря эластичности. Поэтому эксплуатационный срок текстильных строп намного выше, чем у канатных. При этом они обладают прочностью, высокой устойчивостью к износу, практически не подвержены воздействию спирта, кислот, щелочей, нефтепродуктов, масел, растворителей, морской воды, влажности воздуха, солнечного света, абразивных веществ, не теряют своих свойств при больших перепадах температур (-60°C до $+100^{\circ}\text{C}$, плавление происходит при $+150^{\circ}\text{C}$), поэтому используются во всех климатических условиях. И самым важным свойством текстильных строп является гарантия полной сохранности поверхности перемещаемых грузов без дополнительных защитных приспособлений: строп мягко огибает груз и не оставляет царапин или вмятин на хромированных, окрашенных и полированных поверхностях.

Благодаря этим уникальным свойствам текстильные стропы находят широкое применение в авиа- и автомобилестроении, оборонной промышленности и судостроении, строительстве и сельском хозяйстве, машиностроении и железнодорожном транспорте, а также и других отраслях. Особенно незаменимы они при подъеме и закреплении грузов на автотранспорте, перемещении и транспортировке хрупких, легко повреждаемых, окрашенных грузов, крупных животных, мебели, ответственных изделий: монументов, ракетно-космической техники, снарядов, тонкостенных цистерн, литых монументов, труб, при палубном и трюмном креплении на речных и морских судах, на лесоповале, в горноспасательных работах и работе МЧС и др.

Мировой опыт использования текстильных строп подтвердил их чрезвычайную надежность при эксплуатации в самых сложных условиях.

Производство строп представляет собой четко регламентированный наукоемкий процесс, требующий от изготовителя высокой технической оснащенности, наличия высококачественных необходимых материалов и штата высококвалифицированных кадров.

Получение текстильных строп начинается с изготовления синтетических нитей и волокон, которые кроме строп находят также широкое применение в текстильной, химической промышленности, морском и сухопутном транспорте, в быту, и имеют еще множество других практических приложений. В качестве сырья для производства лент могут применяться мультифиламентные нити на основе полипропилена, полиамида (капрона) и полиэстера (лавсана).

Одним из самых распространенных и популярных материалов для синтетических волокон является полипропилен. По объемам переработки он занимает второе место в мире после полиэтилена [6]. Мировое потребление полипропилена составляет 20 млн. тонн в год. Годовые темпы прироста потребления – 10%. В Европе доля полипропилена среди используемых полимеров составляет 70% (поливинилхлорид – 13%, полиэтилен – 17%) [7]. Это объясняется его отличными механическими (прочностными) свойствами, устойчивостью к атмосферным влияниям, к воде, кислотам, щелочам, растворителям, нефти, маслам, ультрафиолетовому излучению (с помощью специальных стабилизаторов), химически активным веществам, обладает цветостойкостью, безвредностью для здоровья и экологичностью, как самой продукции, так и процесса ее производства. Полипропилен – самый легкий по удельному весу (не тонет в воде) и самый экологически чистый материал. Его называют «королем полимеров».

За рубежом использование полипропилена в производстве волокон и нитей является одним из самых емких сегментов рынка полипропилена. Этот рынок потребляет более 30% его мирового выпуска. И хотя в России переработкой полипропилена занимаются около 600 предприятий, ее доля в мировом потреблении полипропилена составляет всего лишь 1%, а в производстве волокон и нитей используется 11% его выпуска.

Сейчас в России существует пять производителей полипропилена (таблица 1), суммарная мощность которых составляет 630 тыс. тонн в год. В связи с чрезвычайной востребованностью полимера на российском рынке эти производства сегодня практически полностью загружены, и в ближайших планах предприятий – наращивание мощностей

Таблица 1 – Мощности по производству полипропилена, тыс. тонн

Название	Мощность, тыс. тонн	Год запуска
ОАО «Нижнекамскнефтехим»	180	2006
ООО «Гомскнефтехим»	130	1981, 2007 – реконструкция и расширение
ООО «Ставролен»	120	2007
ОАО «Уфаоргсинтез»	100	1997
ООО «НПП Нефтехимия	100	1996

Существующие мощности производства полипропилена не удовлетворяют полностью потребности отечественных потребителей. Порядка четверти потребности восполняется импортом. По итогам 2011 года импорт полипропилена в Россию составил 192,8 тыс. тонн (около 0,4 млрд. долларов). По сравнению с 2010 годом, объем импорта полипропилена в РФ в денежном выражении вырос на 17%. Производителями полипропилена, импортированного в Россию в 2011 году, выступили 40 стран. Основной объем импорта составила продукция, произведенная в Украине, Германии, Туркмении и Корее – на долю этих четырех стран пришлось около 50% всего импортированного в Россию полипропилена. Аналитики отмечают значительный рост доли продукции украинских производителей в общем объеме импорта. По итогам 2011 года импорт украинского полипропилена в натуральном выражении вырос на 72% к уровню 2010 года и превысил 40 тыс. тонн.

Импорт нефтехимической продукции в РФ за первое полугодие 2012 года по данным Федеральной таможенной службы [www.rupec.ru/news/?ID=5538] составил 516,8 тыс. тонн, что на 10,8% выше показателя за аналогичный период 2011 года. Такие показатели обусловлены с одной стороны остановкой части нефтехимических производств на ремонт и модернизацию, а с другой стороны слабое внимание со стороны государства за развитием нефтехимической промышленности в последние десятилетия. Удивляться особенно нечему, если посмотреть на цифры, характеризующие долю России в мировой переработке нефти – 4,4% и газа – 2,3%.

За последние десять лет потребление полипропилена в России на душу населения возросло в 5 раз и составило 5,5 кг (по данным компании «Маркет Репорт» на 2010 г.). Мировое потребление составляет 12 кг полипропилена на человека. Прогнозируется стремительный рост производства (к 2015 году мощности по производству полипропилена должны увеличиться в 3 раза) и рынка полипропилена в России, что, несомненно, будет способствовать развитию его переработки и сокращение импорта готовой продукции.

В то же время, рынок полипропилена, как и полиэтилена, переживает беспрецедентный период нестабильности, обусловленный тесной связью с ценообразованием на нефть, что однозначно сказывается на издержках производителей конечной продукции.

Необходимый тип нити для строп получают на оборудовании AUSTROFIL HT австрийской фирмы SML [8], которое предназначено для производства полипропиленового мультифиламентного волокна в диапазоне линейных плотностей 550 – 3300 дтекс (500 – 3000 денье). По западноевропейской классификации волокно определяется как FDY или FOY (Fully Drawn Yarn or Oriented – полностью вытянутое или ориентированное волокно). Волокно применяется как швейные нитки, техническая пряжа и другие текстильные применения. Нить получают в процессе вытягивания и скручивания в прядильной установке в два этапа с предварительным прогревом сырья. Количество филаментов (единичных, или эле-

ментарных нитей) в скрученной нити может составлять от 74 до 296 в зависимости от назначения и области применения будущей ткани.

Установка обеспечивает следующий цикл работы:

- Многоточечный впрыск расплава полипропиленового гранулята волокнообразующих марок с индексом текучести 18 -25 г/10 мин с последующим охлаждением, вытяжкой и намоткой на картонную гильзу.

- Подача основного материала производится пневмотранспортным устройством подачи из накопительного бункера, размещенного возле машинного оборудования.

- Дозирование и смешивание основного материала осуществляется четырехкомпонентным автоматом. Этот автомат работает на принципе объемного дозирования. Вся система дозирования работает непрерывно, хотя дозировка осуществляется циклически.

- Смесь гранулята с ультрафиолетовым стабилизатором и цветовым пигментом подается во входную воронку экструдера. В экструдере полимерный материал расплавляется, гомогенизируется и пластифицируется при одновременном воздействии на него вращения шнека и заданного температурного режима. Температура устанавливается таким образом, чтобы обеспечить постепенный нагрев материала в пяти зонах экструдера. Все пять температурных зон регулируются автоматически для соблюдения установленных значений.

- На выходе шнека находится специальное устройство-адаптер, предназначенное для гомогенизации расплава и гарантирующее при высокой производительности однородность смеси. Потом следует фильтр, предназначенный для устранения грязи из полимера. Автоматическая подача сит фильтра обеспечивает соблюдение давления расплава перед фильтром. Если оно поднимется выше установленного значения, то произойдет автоматическое выключение привода шнека.

- Затем расплав переходит в нитеобразующую часть, состоящую из четырех рабочих секций. Каждая секция имеет отдельный насос для двух прядильных головок с фильерами. Количество отверстий в фильерах 102 или 148, их использование зависит от линейной плотности выпускаемого волокна и показателя текучести расплава используемого полимера. Далее волокно проходит через воздушное охлаждающее устройство, разделенное на три горизонтальные зоны. В этих зонах скорость воздуха управляется заслонками. Интенсивность охлаждения зависит от линейной плотности выпускаемого волокна.

- Из охлаждающего устройства волокно поступает на устройство нанесения прядильной аппретации. Раствор подается дозирующими насосами из накопительной емкости (бочки) в аппликатор. Аппретация предназначена для качественного объединения волокон и создания равномерного, хорошо перерабатываемого при последующих операциях материала.

- Волокно передается подающим роликом в вытяжное устройство. Вытяжное устройство образовано тремя парами прядильных дисков и печью с горячим воздухом. Каждый прядильный диск имеет отдельный привод и нагрев. Прочность волокна достигается вытяжкой за счет разных скоростей вращения прядильных дисков.

- Сама вытяжка двухступенчатая. Первая ступень вытяжки происходит между первой и второй парами прядильных дисков. Вторая ступень между второй и третьей парами прядильных дисков, между которыми волокно проходит через печь с горячим воздухом.

- Вытянутое волокно с третьей пары прядильных дисков проходит через камеру пневмосоединения нитей. В ней волокно продувается сжатым воздухом, за счет чего происходит спутывание филаментов волокна через определенные промежутки времени. Этим обеспечивается компактность волокна при намотке и дальнейшем использовании.

- Намоточное устройство рассчитано для намотки двух катушек и управляется собственным блоком управления. Начиная с линейной плотности 200 дтекс, волокно изготавливается в одну катушку. Объединение двух нитей в одну производится на выходе волокна из печи горячего воздуха.

- Готовое волокно автоматически подается из намоточного устройства на вал технологической тележки. Оператор перемещает готовые катушки с волокном на транспортную тележку, а технологическую возвращает обратно под намоточное устройство.

- Оператор при помощи пневмопистолета удаляет с катушек 30-50 метров технологического запаса волокна, завязывает узлом свободный конец волокна вокруг катушки, наклеивает маркировочную этикетку внутрь картонной трубки и упаковывает катушку в полипропиленовый мешок.

- Упакованные таким образом катушки укладываются в гофрокороб в три ряда по 18 катушек в ряд. Гофрокороб устанавливается на деревянный поддон, увязывается стреппинг-лентой в двух поперечных направлениях и обматывается стрейч-пленкой. Сформированная таким образом единица транспортной упаковки сдается на склад для дальнейшей отгрузки потребителю в установленном порядке.

Кроме того, имеется возможность дополнительной крутки произведенного волокна на кольцевой крутильной машине R341 DT/56-NT260 итальянской фирмы Ratti Luino SRL. Количество круток на метр от 40 до 900, крутка возможна как в левую, так и в правую стороны.

Новый импульс для развития российского бизнеса на основе продуктов полимерного производства открывает применение нанотехнологий на всех этапах изготовления полимерных материалов (экструзия, формование, вспенивание, укрепление поверхностного слоя, пленки и т.д.). По мнению многих экспертов, компании, которые первыми станут применять нанотехнологии, станут в один ряд с мировыми производителями.

На сегодняшний день существует два принципиально отличающихся по технологии вида текстильных строп: ленточные и круглопрядные.

В свою очередь, ленточные стропы подразделяют на петлевые и кольцевые. Петлевые стропы могут быть снабжены на концах текстильными петлями, грузовыми крюками, скобами или делаться комбинированными, т.е. иметь на одном конце грузовой крюк или скобу, а на другом конце обычную текстильную петлю (огон). Кольцевые стропы, соответственно, петель не имеют и представляют собой сшитую кольцом текстильную ленту.

Ленточные стропы изготавливаются из плоской текстильной ленты, которая в зависимости от технологии изготовления сшивается в один или два слоя. Большую грузоподъемность можно достичь, сшивая большее количество слоев. Очевидно, при этом гибкость стропа уменьшается.

По желанию заказчика грузоподъемность может быть обеспечена либо путем применения более широкой текстильной ленты, сшитой в один слой, либо из более узкой ленты, сшитой в два слоя.

Одним из крупнейших производителей высококачественной технической текстильной ленты в России является ЗАО «Орлен» (г. Орел) [9], специалисты которой прошли обучение на ведущих ткацких предприятиях Швейцарии и Чехии.

В компании на производственных площадях более 1500 кв. м установлено новейшее лентоткацкое оборудование швейцарской фирмы Jakob Muller AG. Специализированные лентоткацкие станки предназначены для выработки лент для стропов, стяжных ремней, буксировочных тросов, для обработки петель стропа (лента протекторная), чехлов для круглопрядных стропов, лент технического и бытового назначения легкой, средней и тяжелой групп из любых волокон. Эти станки позволяют с высокой скоростью производить ленту шириной от 30 до 300 мм и разрывной нагрузкой до 60 тонн. Челнок ткацкой машины осуществляет переплетение нитей в соответствии с заданным дизайном.

На предприятии установлено современное единственное в центральном регионе покрасочное и термофиксирующее оборудование. Полученная на лентоткацких станках лента попадает на это оборудование, которое позволяет окрашивать ее в цвета, соответствующие европейским стандартам, и обрабатывать под воздействием температуры специальными химическими растворами, повышающими грузоподъемность и износостойкость продукции. Каждая партия продукции поставляется с сертификатом испытаний.

Круглопрядные стропы – это один из видов текстильных строп. Круглопрядные стропы представляют собой новую концепцию грузозахватных приспособлений, используемых для подъема, перемещения и транспортирования грузов. Круглопрядные стропы имеют форму кольца и состоят из несущего сердечника и тканого защитного кожуха (чехла). Форма

круглопрядного стропа в виде замкнутой петли позволяет постоянно менять точки контакта стропа с крюком и грузом, обеспечивая ему повышенную износостойкость. Сердечник в круглопрядных стропах изготавливается из большого количества параллельно расположенных кольцевых полимерных волокон, образующих плотный пучок. Сердечники строп могут изготавливаться из различных видов нитей: полиамидных; полиэстеровых; полипропиленовых. Чехлы для круглопрядных строп изготавливаются из плотного синтетического материала. Чехол не только позволяет предохранить внутренние волокна сердечника от повреждения, но и сохраняет их в постоянном параллельном положении. Обладая высокой устойчивостью к истиранию и высокими теплоизоляционными свойствами, защитный чехол способствует устранению теплового эффекта трения, возникающего в месте затяжки петли стропа при «сдавливающем» подъеме грузов с большой массой.

Окраска лент текстильных стропов должна соответствовать грузоподъемности согласно международному цветовому коду:

Грузоподъемность стропа, т	Цвет	Грузоподъемность стропа, т	Цвет
1,0	фиолетовый	5,0	красный
2,0	зеленый	6,0	коричневый
3,0	желтый	8,0	синий
4,0	серый	10,0 и более	оранжевый

Испытание стропов осуществляется на разрывных машинах натяжением под действием нагрузки, развиваемой гидроцилиндром с пружинным возвратом штока. Шток гидроцилиндра связан с подвижной кареткой, к которой крепят одним концом строп. Другой конец стропа крепят к натяжной каретке, которую фиксируют на требуемой длине пальцами. Специальной гайкой выбирают слабину, осуществляя предварительное натяжение испытываемого стропа. Испытания производятся в соответствии с РД 24-СЗК-01-01 «Стропы грузовые общего назначения на текстильной основе. Требования к устройству и безопасной эксплуатации».

Высокая конкуренция не только на международном, но и на внутреннем рынке текстильных строп вынуждает производителей постоянно совершенствовать свое производство и внедрять новые технологии, например, покрывать поверхность текстильных строп слоем полиуретана, для круглопрядных строп применять силовой сердечник нового поколения из высокопрочной нити и др.

Фирма ЗАО «Ланекс-Канат» производственного дивизиона холдинга ЗАО «Пром-сталь» ведет активную работу по созданию нового инновационного продукта с одним из ведущих европейских производителей искусственных нитей и изделий из них – чешской компанией Lanex (Volatic) – PP (полипропиленовой нити) мультифиламентной нити с новыми свойствами. Испытания нового продукта проходят сейчас в испытательном центре г. Брно. Уникальные новые свойства полипропиленовые нити приобрели после введения специальных высокотехнологичных нанодобавок: при нагревании такой нити до 165% наблюдается полное отсутствие дыма, а при нагревании свыше этой температуры происходит ее плавление без выделения в окружающую среду каких-либо вредных веществ. В конечном итоге выигрывают потребители, получая стропы высокого качества, открываются новые рынки сбыта в России и за рубежом.

Россия вступила в ВТО, что обостряет конкуренцию не только между российскими компаниями в этом сегменте рынка, но и с ведущими игроками мирового уровня, например, «Bandweberei E.Oppermann GmbH», «Dolezych GmbH & CoKG», «GeRon Gurt und hebetchnik», «SpanSet GmbH», MBG Techbelt Innovation GmbH (Германия), «Haklift ABT Oу» (Финляндия), Unitex Group (США) и др.

Инновации не обошли и канатное производство. Примером может служить производство комбинированных канатов, которое ЗАО «Канат» освоило в 2000 году. Комбинированный канат представляет собой канат, свитый из стальных оцинкованных проволок, покрытых полипропиленом (фибриллированной нитью). Такие канаты находят широкое применение в рыболовецком флоте в качестве траловых, для снюрреводов (донных неводов), «порядков» для ловли крабов, для изготовления сеток при выращивании моллюсков, в качестве швартовых и др.

В настоящее время сортамент выпуска таких канатов очень широк. Это и большой диапазон диаметров от 6 до 46 мм, и различные конструкции («Тайфун», «Альбатрос», Геркулес», «Нептун» и другие всевозможные конструкции по заказам рыбаков), а также различные комбинации полимерного материала по цвету и физико-механическим свойствам, например, с положительной или отрицательной плавучестью.

В последнее время в ЗАО «Канат» стали применяться новые наукоемкие технологии при производстве комбинированных канатов. В первую очередь, это применение новых полимерных материалов импортного производства, например, «Polys» чешской фирмы «Lanex».

Этот материала обладает рядом исключительных свойств по сравнению с обычным полипропиленом:

- прочность в 2 раза выше;
- износостойкость в 3 раза больше;
- термостабилизация - отличная устойчивость к ультрафиолетовому излучению, не разлагается на солнце;
- нулевая водопоглощаемость - держится на воде;
- низкая температура плавления (150° С);
- отличная изоляционная способность;
- широкая цветовая гамма;
- металлический вид;
- высшая удельная прочность;
- канаты сертифицированы Российским Морским Регистром Судоходства и “Germanischer.Lloyd”;
- канаты из материала “POLYS” превосходят все остальные канаты, используемые в рыболовстве, морском транспорте, производстве сетей и других орудий лова.

В сочетании с инновациями, разработанными ЗАО «Канат», по ликвидации крутимости канатов, предварительной вытяжке, термостабилизации и многому другому позволило поднять уровень качества канатов до уровня, а иногда и выше производителей Норвегии, Дании, признанных «законодателей мод» в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт Президента России - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xn--d1abbgfbaiiy.xn--p1ai/>.
2. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения / Е.Ю. Степанова, Ю.С. Степанов // Экономические и гуманитарные науки. – №12 (239). – 2011. – С. 24 - 31.
3. Степанова, Е.Ю. Инновационная деятельность и интеллектуальная собственность: проблемы и решения В кн. «Повышение эффективности использования объектов интеллектуальной собственности в управлении инновационно-инвестиционными процессами / Под общей ред. В.А. Голенкова, Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ, 2005. – С. 86 – 94.
4. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова // Известия Орловского государственного технического университета. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел. – 2007. - № 3/267(533). – С. 156–167.
5. Степанов, Ю.С. Наукоемкие технологии в изготовлении текстильных строп / Ю.С. Степанов, В.И. Мельников, Е.Ю. Степанова // Наукоемкие технологии в машиностроении. -№ 11. – 2012. – С. 22 – 26.
6. Яруллин, Р. Король пластмасс / Р. Яруллин // Нефтехимия Российской Федерации. - № 5. – 2011. – С. 16 – 19.
7. Лапин А.В. Проблемы переработки полипропилена [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kronosgroup.ru/uploads/Archive/pp2008.swf>.

8. Официальный сайт Чешско-Российского предприятия «Ланекс-канат» - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lanex-kanat.ru>.

9. Официальный сайт компании «Орлен» [Электронный ресурс]. Режим доступа: - www.orel-lenta.ru.

Степанова Елена Юрьевна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
Кандидат экономических наук, доцент,
E-mail: e15@mail.ru

Мельников Вадим Игоревич

ЗАО «Орлен», г. Орел
Коммерческий директор
E-mail: orlen.orel@yandex.ru; samson-vadim@yandex.ru

E.Y. STEPANOVA, V.I. MELNIKOV

**INNOVATION AND HIGH TECHNOLOGY
IN MULTIFUNCTIONAL HOLDING ON PRODUCTION TEXTILE
AND COMBINED LINE ROPE
(ON THE EXAMPLE OF JSC "PROMSTAL" OREL)**

Analyzes the status, problems of innovative development of the country's economy. We consider innovation and high technology production of synthetic polypropylene yarn, textile slings, and combined-plated cables.

Keywords: *innovation, innovation development, polypropylene thread, technology, textile slings, combined ropes.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sajt Prezidenta Rossii - [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://xn--d1abbgf6aiiy.xn--p1ai/>.
2. Stepanova, E.Ju. Marketing innovacij: problemy i reshenija / E.Ju. Stepanova, Ju.S. Stepanov // Jekonomicheskie i gumanitarnye nauki. – №12 (239). – 2011. – S. 24 - 31.
3. Stepanova, E.Ju. Innovacionnaja dejatel'nost' i intellektual'naja sobstvennost': problemy i reshenija V kn. «Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija ob#ektov intellektual'noj sobstvennosti v upravlenii innovacionno-investicionnymi processami / Pod obshej red. V.A. Golenkova, Ju.S. Stepanova. – M.: Mashinostroenie-1, Orel: OrelGTU, 2005. – S. 86 – 94.
4. Stepanova, E.Ju. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike / E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – Orel. – 2007. - № 3/267(533). – S. 156–167.
5. Stepanov, Ju.S. Naukoemkie tehnologii v izgotovlenii tekstil'nyh strop / Ju.S. Stepanov, V.I. Mel'nikov, E.Ju. Stepanova // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. - № 11. – 2012. – S. 22 – 26.
6. Jarullin, R. Korol' plastmass / R. Jarullin // Neftehimija Rossijskoj Federacii. - № 5. – 2011. – S. 16 – 19.
7. Lapin A.V. Problemy pererabotki polipropilena [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://kronosgroup.ru/uploads/Archive/pp2008.swf>.
8. Oficial'nyj sajt Cheshsko-Rossijskogo predprijatija «Laneks-kanat» - [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.lanex-kanat.ru>.
9. Oficial'nyj sajt kompanii «Orlen» [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: - www.orel-lenta.ru.

Stepanova Elena Yurievna

State University – Educational-Scientific-Manufacturing Complex, Orel)
Cand.Econ.Sci
E-mail: e15@mail.ru

Melnikov Vadim Igorevich

Closed Joint Stock Company "Orlen, Orel
Commercial Director of the company
E-mail: orlen.orel@yandex.ru; samson-vadim@yandex.ru

УДК 371.261

А.В. КИРИЧЕК, А.В. МОРОЗОВА, Ю.В. ВАСИЛЕНКО

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНИЦИАТИВНОГО ПРОЕКТА ПО РАЗРАБОТКЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

В статье анализируется опыт целевой разработки теоретико-методологической обеспечения магистерской программы (на примере направления 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств») с привлечением научно-педагогических кадров различных вузов и исследовательских центров России и ближнего зарубежья в форме инициативного научно-исследовательского проекта

Ключевые слова: *специалист, основная образовательная программа, магистратура*

Постановка проблемы исследования.

Одной из актуальных проблем, связанных с переходом системы высшего профессионального образования на многоуровневую подготовку кадров для современного производства, является проблема оперативного обновления содержания образования в соответствии в требованиями инновационного производства и достижениями научной мысли.

Актуальность и новизна.

Вариативная часть ООП магистратуры формируется с учетом основных направлений научных исследований выпускающей кафедры. В этой связи становится очевидным, что и теоретико-методологическое обеспечение магистерской программы также включает в себя эти направления. Если же такая база формируется исключительно на достижениях лишь одной или нескольких научных школ, реализующих свою деятельность на базе выпускающей кафедры вуза, то содержание такой программы будет основываться лишь на разработках одной кафедры.

Пути решения проблемы.

Для преодоления потенциальной ограниченности содержания магистерской программы и его расширения путем включения современных достижений нескольких научных школ, развивающих определенные исследовательские направления на базе различных вузов и исследовательских центров России и ближнего зарубежья, целесообразна комплексная целевая издательская поддержка подготовки специалистов в рамках магистерской программы. Такая комплексная программа имеет инициативный характер, реализуется силами выпускающей кафедры в форме научно-исследовательского проекта. Общая схема продвижения такого проекта представлена на рисунке 1.

На этапе разработки ООП подготовки магистров по направлению формируется перечень учебных дисциплин и дидактических единиц ее вариативной части, которые должны освоить выпускники, а также формируется перечень основной литературы, которая должна стать базой освоения этой программы.

В магистерских программах вариативная часть должна содержать учебные дисциплины, отвечающие за углубленную подготовку в сфере гуманитарных, социальных, экономических и математических знаний. Они направлены на получение высшего профессионального образования, позволяющего выпускнику успешно работать в сфере машиностроительного производства, обладать универсальными и предметно-специализированными общекультурными, профессиональными и специальными компетенциями, способствующими его социальной мобильности и устойчивости на рынке труда. Поэтому следующим этапом реализации инициативного проекта стал анализ учебно-методического обеспечения учебного процесса и формирование задания на выполнение НИР по исследованию результатов работы ведущих специалистов научных школ России и ближнего зарубежья в рамках профиля проектируемой ООП подготовки магистров. Этот этап включает в себя сбор, систематизацию, анализ научного материала, опубликованного в периодической печати, диссертационных исследованиях и прочих научных изданиях, а также информирование научной общественности о подготовке научных изданий в рамках комплексной программы целевой издательской под-

держки магистерской программы определенного профиля. Обобщение полученной информации осуществляется на этапе формирования тематики, структуры и содержания научных изданий, их согласования с соавторами, а также публикации подготовленных изданий.

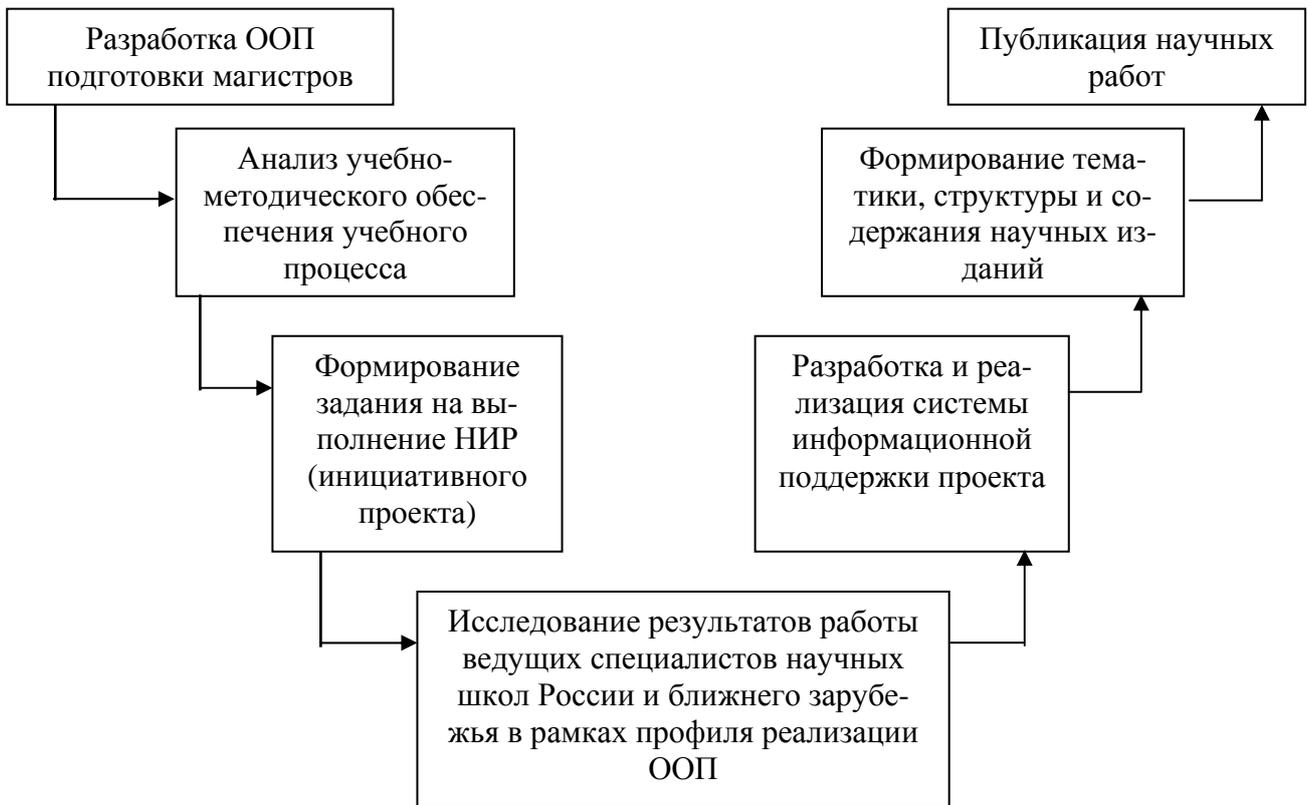


Рисунок 1 – Схема продвижения инициативного проекта разработки научно-методического обеспечения магистерской программы

Так, например, в рамках реализации инициативного проекта разработки научного обеспечения основной образовательной программы магистратуры по направлению 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (инициатор проекта - Технологический институт имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс») были подготовлены следующие издания.

В монографии «Моделирование технологических процессов абразивной обработки» [1] анализируются актуальные проблемы моделирования технологических процессов абразивной обработки: исследованиям в области резания материалов гидроабразивной струей; разработки и применения регрессионной модели точности обработки; новые способы обработки, обеспечивающие формирование на поверхности детали изотропного микрорельефа; формирования модели интенсивности сопротивления материала резанию при температурно-скоростном режиме шлифования; компьютерного моделирования поверхности абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности и другие.

Монография «Прогрессивное машиностроительное оборудование» [2] посвящена актуальным проблемам разработки прогрессивного оборудования для механической обработки деталей машин. В монографии рассматривается структурно-параметрический синтез металло-режущих станков, кинематика оборудования на основе механизмов параллельной структуры, в том числе для высокоточной обработки деталей сложной формы, приставные станки для восстановления геометрической точности деталей крупногабаритных вращающихся агрегатов, оборудование для упрочнения волной деформации в процессе статико-импульсной обработки. Монография ориентирована на инженерно-технических и научных работников, аспирантов, а также всех тех, кто интересуется вопросами разработки и внедрения в производство прогрессивного машиностроительного оборудования.

Актуальным проблемам создания эффективных технологий режущего, деформирующего и комбинированного деформирующе-режущего протягивания, проектированию процессов дорнования и упрочнения волной деформации внутренних цилиндрических поверхностей деталей, исследованиям скоростного протягивания деталей газотурбинных двигателей, режуще-деформирующей обработке резьб и обработке нержавеющей сталей с опережающим пластическим деформированием посвящена монография «Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки» [3].

Монография «Повышение эффективности обработки резанием» [4] раскрывает актуальные проблемы повышения эффективности лезвийной обработки кинематически сложных процессов на основе анализа схем резания, особенностям стружкообразования и контактного взаимодействия при прерывистом резании, анализу результатов исследования и разработке способа обработки внутренних поверхностей вращения крупногабаритных цапф в условиях эксплуатации, исследованию закономерностей точения рабочей поверхности литейных дисков из сплавов меди при производстве аморфной ленты, методу исследования закономерностей прерывистого резания, а также нарезанию резьб на станках с ЧПУ круглыми многоночными резцами.

В монографии «Прогрессивные технологии нанесения покрытий» [5] анализируются проблемы повышения прочности сцепления газопламенных покрытий, применения защитных покрытий на основе металлических и полимерных частиц, исследования влияния параметров электроискрового легирования на стабильность процесса формирования покрытий, изучения структуры и технологии фторсодержащих покрытий металлополимерных трибосистем, а также применения нанопленок эпиламов в технологических процессах механической обработки.

Монография «Прогрессивные машиностроительные технологии. Том I» [6] посвящена актуальным проблемам разработки прогрессивных технологий механической и физико-технической обработки, упрочняющей и комбинированной обработки деталей машин. Монография ориентирована на инженерно-технических и научных работников, аспирантов, а также всех тех, кто интересуется вопросами разработки и внедрения в производство прогрессивного машиностроительного оборудования.

Проблемам ультразвуковой экспресс-диагностики качества поверхности машиностроительных изделий, электрическим методам трибомониторинга, резонансному методу контролю толщины покрытий, комплексному диагностированию подшипниковых узлов, методам оценки контактной выносливости различно упрочненных поверхностей посвящена монография «Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий» [7].

Монография «Технологическое обеспечение качества и ресурса при изготовлении, сборке, ремонте и восстановлении» [8] посвящена актуальным проблемам увеличения ресурса работы валопроводов турбогенераторов на основе последовательного применения технологических методов адаптационной сборки, разработки технологического обеспечения и повышения качества высоконагруженных поверхностей деталей машин, формирования противозносных слоев на поверхностях трения металлополимерных трибосистем, восстановления работоспособности крупногабаритных мельничных агрегатов приставными станками, вопросам деформирования и диссипации энергии конструкционных сталей, а также обеспечения высокой несущей способности ответственных деталей машин упрочняющими технологиями.

В монографии «Инновационное развитие и кадровое обеспечение современного машиностроения» [9] рассматриваются вопросы реализации кластерной политики в различных регионах Беларуси, направления практического воплощения интеграционного принципа формирования инфраструктуры интеллектуального обеспечения региональной инновационной деятельности путем создания учебно-научно-производственных комплексов, обосновывается возможность формализованного проектирования профессиональных компетенций инженерно-технических кадров в соответствии с уровнем развития социально-экономического базиса региона, а также анализируется опыт разработки и внедрения в практику технического вуза, имеющего статус учебно-научно-производственного комплекса, тестовой квалиметрии креа-

тивных качеств студентов, целью которого является их последующее вовлечение в активную зону научно-исследовательской деятельности кафедр и факультетов.

Монография «Прогрессивные узлы и агрегаты технологических машин» [10] посвящена актуальным проблемам разработки и внедрения в производство прогрессивных узлов и механизмов технологических машин: разработке теоретических основ и методике обучения навыко-вычислительных машин технического зрения и практике изготовления опытных образцов для управления многокоординатной электромеханической системой промышленных роботов ТУР-10К и PUMA; результатам исследований характеристик и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт; практике рационального выбора основных параметров динамических гасителей колебаний гироскопического типа и оптимального синтеза входящих в их конструкцию устройств; исследованиям в области создания вибробезопасных машин путем применения нового метода оценки уровней низкочастотной вибрации на сиденье оператора, заключающемся в регистрации переходной функции реакции машины на единичное ступенчатое возмущение и последующем пересчете полученных данных к нормируемым параметрам вибраций в стандартных или произвольных условиях работы машины; исследованиям реологических процессов течения сплошных дисперсных сред фундаментальными методами ротационной и капиллярной вискозиметрии, а также разработке оригинальных установок для сравнительной оценки износостойкости деталей машин, теряющих работоспособность по критерию контактной выносливости.

Решению ряда актуальных проблем, возникающих при создании новых технологий: получения наноконпозиционных машиностроительных материалов на основе полимерных частиц; изучению механизмов формирования структуры наноконпозиционных материалов на основе полимерных и олигомерных матриц; разработке методов модифицирования компонентов трибосистем фторсодержащими ингибиторами изнашивания; технологиям формирования противоизносных слоев на рабочих поверхностях элементов трибосистем; выбору рациональных параметров обработки по результатам моделирования накатывания резьб методом конечных элементов посвящена монография «Прогрессивные машиностроительные технологии. Том II» [11].

Монография «Прогрессивные инструменты и технологии шлифования» [12] анализирует актуальные проблемы разработки и внедрения в машиностроительное производство прогрессивных шлифовальных инструментов с дискретной режущей поверхностью, разработки и внедрения технологических эксплуатационных паспортов шлифовальных кругов, исследования технологической обрабатываемости материалов в процессе шлифования, а также вопросы повышения эффективности шлифования совершенствованием техники подачи смазочно-охлаждающей жидкости.

Актуальным проблемам исследования особенностей структуры и свойств наноконпозиционных машиностроительных материалов на основе полимерных и олигомерных матриц, разработке эффективных методов повышения параметров служебных характеристик фторсодержащих материалов на полимерных и олигомерных матрицах при их использовании в виде изделий из композиционных материалов, покрытий и смазок, исследованиям особенностей разработки функциональных наноконкомпозитов для применения в различных отраслях машиностроения, а также технологиям естественного армирования материала регулярными наноструктурными или ультрамелкозернистыми фрагментами с целью кратного повышения эксплуатационных свойств широкой номенклатуры полноразмерных, в том числе крупногабаритных, изделий посвящена монография «Наноконпозиционные и наноструктурные машиностроительные материалы и технологии их получения» [13].

В подготовке данных изданий принимали участие творческие коллективы специалистов России, Украины, Беларуси, Узбекистана Таджикистана. Проект был реализован в период 2011- 2013 гг. и содержал 13 научных изданий, которые позволили обеспечить информационную и методическую поддержку основной образовательной программы магистратуры по направлению 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в рамках реализации следующих учебных дисциплин (табл. 1).

Таблица 1 - Матрица соответствия составных частей ООП и научных изданий, подготовленных в рамках реализации комплексной программы целевой издательской поддержки ООП магистратуры по направлению 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

М.1. Общенаучный цикл		Научные издания¹
Базовая часть		
М.1.А.1	Деловой иностранный язык	+
М.1.А.2	Философские проблемы науки и техники	+
М.1.А.3	История и методология науки и производства	+
М.1.А.4	Экономическое обоснование научных решений	[9]
М.1.А.5	Математическое моделирование в машиностроении	[1];[7]
М.1.А.6	Компьютерные технологии в науке и производстве	[1]
Вариативная часть		
М.1.Б.1	Научные основы технологии машиностроения	[2];[3];[4];[5];[6]; [7];[8];[10]; [11];[12];[13]
М.1.Б.2	Патентование	+
М.1.Б.3	Защита интеллектуальной собственности	+
М.1.Б.4	Автоматизированные системы научных исследований	[2]
М.1.Б.5	Эвристические методы в инженерном деле	[7];[9]
М.1.Б.6	Педагогика и психология высшей школы	[9]
Дисциплины, изучаемые по выбору		
М.1.В.1.1/ М.1.В.1.2	Методы обработки экспериментальных данных / Основы планирования эксперимента	[1];[7]
М.1.В.2.1/ М.1.В.2.2	Профессиональный иностранный язык / Иностранный язык в машиностроении	[1];[2];[3];[4];[5]; [6];[7];[8];[10]; [11];[12];[13]
М.2 Профессиональный цикл		
Базовая часть		
М.2.А.1	Методология научных исследований в машиностроении	[1];[3];[6];[11]
М.2.А.2	Нанотехнологии в машиностроении	[5];[13]
М.2.А.3	Надежность и диагностика технологических систем	[7];[8]
М.2.А.4	Современные проблемы инструментального обеспечения машиностроительных производств	[2];[4];[10];[12]
М.2.А.5	Расчет, моделирование и конструирование оборудования с компьютерным управлением	[1]
М.2.А.6	Технологическое обеспечение качества	[7];[8];[12]
Вариативная часть		
М.2.Б.1	Теоретические основы САПР	[1]
М.2.Б.2	Промышленные технологии и инновации	[9];[10]
М.2.Б.3	Управление инновационными проектами	[9]
Дисциплины, изучаемые по выбору. <i>Программа 151900.68.08 "Конструкторско-технологическое обеспечение высокоэффективных процессов обработки материалов"</i>		

¹ Наличие в графе символа «+» означает, что данная учебная дисциплина полностью обеспечена изданиями, разрабатываемыми кафедрами вуза, не являющимися выпускающей

М.2.В.1.1	Технологии высокоэффективных процессов обработки	[3];[4];[6];[11];[12]
М.2.В.2.1	Контроль и автоматизация ВПО	[4];[7];[8]
М.2.В.3.1	Теоретические основы высокоэффективных процессов обработки материалов	[3];[4];[6];[12]
М.2.В.4.1	САПР высокоэффективных процессов обработки	[1];[4];[12]
М.2.В.5.1	Автоматизированная подготовка УП для оборудования с ЧПУ	[4]
М.2.В.6.1	Проектирование специализированного оборудования и оснастки для ВПО	[2];[4];[8];[10]
М.3 Практики и научно-исследовательская работа		
М.3.1	Научно-производственная практика	+
М.3.2	Педагогическая практика	+
М.3.3	Научно-исследовательская работа	+
М.4 Итоговая государственная аттестация		
Ф Факультативы		
Ф1	Философские вопросы технических наук	+
Ф2	Подготовка и оформление результатов НИР	+

Вывод

Разработка теоретико-методологического обеспечения магистерской программы в форме инициативного научно-исследовательского проекта позволяет не только оптимизировать структуру и минимизировать расходы на библиотечного обеспечения ООП, но и значительно активизировать научную деятельность выпускающих кафедр и их социальное взаимодействие с профильными кафедрами других вузов, занимающихся разработкой определенных научных направлений и тем.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование технологических процессов абразивной обработки. Монография. / Г.В. Барсуков, Л.Г. Вайнер, Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, А.А. Дьяконов, А.М. Козлов, А.В. Михеев, А.В. Морозова, П.П. Переверзев, Ю.С. Степанов; Под ред. Ю.С. Степанова и А.В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. - 256 с.
2. Прогрессивное машиностроительное оборудование. Коллективная монография. / В.В. Ержуков, А.Г. Ивахненко, Е.О. Ивахненко, А.В. Киричек, В.В. Куц, А.В. Морозова, Л.А. Рыбак, Д.Л. Соловьев, М.А. Федоренко, А.В. Чичварин, В.П. Яглинский; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 248 с.
3. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки. Коллективная монография. / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек, Д.В. Крайнев, А.Р. Лебедев, В.Ф. Макаров, А.В. Морозова, П.А. Норченко, Ю.Н. Полянчиков, Д.Л. Соловьев; Под ред. А.В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. - 328 с.
4. Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография. / С.И. Брусов, Г.И. Добровольский, Д.Ю. Дубров, В.П. Иванов, А.В. Катунин, А.В. Киричек, А.В. Морозова, О.В. Полохин, Т.М. Санина, Ю.А. Сергеев, В.А. Солодков, А.Е. Шешков, А.С. Тарапанов, Д.Е. Тарасов, А.В. Хандожко, О.М. Щебров; Под ред. А.В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 304 с.
5. Прогрессивные технологии нанесения покрытий. Монография. / С.В. Авдейчик, А.С. Воронцов, В.М. Давыдов, Е.А. Звягина, В.П. Иванов, В.И. Кравченко, А.В. Киричек, В. Н. Коренев, Е.А. Ледков, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, М.Ф. Селеменев, А.А. Скаскевич, В.А. Струк, С.Н. Химухин, В. Н. Хромов, Е.И. Эйсымонт; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 272 с.
6. Прогрессивные машиностроительные технологии. Коллективная монография. / А.Н. Афонин, Е.В. Гапоненко, О.Ю. Еренков, А.М. Иванов, А.Г. Ивахненко, А.В. Киричек, В.Н. Ли, Ю.А. Мамаев, А.В. Морозова, Ю.Н. Платонова, Л.А. Рыбак, В.А. Санинский, Е.В. Смоленцев, Н.А. Сторчак, М.А. Теслина, С.Н. Химухин, Ю.Л. Чигиринский; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», Том 1., 2012. – 334 с.
7. Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий. Коллективная монография. / М.И. Абашин, А.А. Барзов, С.В. Баринов, А.Л. Галиновский, В.П. Иванов, А.В. Киричек, В.Г. Лисичкин, В.В. Марков, В.В. Мишин, А.В. Морозова, Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов; Под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 320 с.

8. Технологическое обеспечение качества и ресурса при изготовлении, сборке, ремонте и восстановлении. Коллективная монография. / С.М. Белобородов, Ю.А. Бондаренко, А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.М. Иванов, В.П. Иванов, А.В. Ким, А.В. Киричек, А.В. Конопляник, Е.С. Лукин, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, М.В. Песин, В.Я. Прушак, Ю.А. Прушак; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 284 с.

9. Инновационное развитие и кадровое обеспечение современного машиностроения. Коллективная монография. / О.В. Авдейчик, В.М. Александров, А.В. Морозова, Л.Н. Нехорошева, А.В. Струк, Н.И. Фельдман, Н.В. Чигиринская; Под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. - 226 с.

10. Прогрессивные узлы и агрегаты технологических машин. Коллективная монография. / С.В. Барин, А.А. Буков, В.С. Ванин, С.С. Гутьера, В.А. Данилов, В.П. Иванов, В.В. Кавыгин, А.В. Киричек, В.П. Корячкин, А.В. Морозова, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов, М.П. Шишкарев; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 272 с.

11. Прогрессивные машиностроительные технологии. Том II. Коллективная монография. / С.В. Авдейчик, А.Н. Афонин, В.В. Воропаев, В.П. Иванов, А.В. Киричек, В.А. Лиопо, Л.В. Михайлова, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, А.А. Рыскулов, А.А. Скаскевич, В.А. Струк, Е.И. Эйсымонт; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 336 с.

12. Прогрессивные инструменты и технологии шлифования. Коллективная монография. / Д.В. Ардашев, Ю.В. Василенко, В.Г. Гусев, А.А. Дьяконов, В.П. Иванов, А.В. Морозов, А.В. Морозова, А.В. Тюхта, П.С. Швагирев; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2013. - 320 с.

13. Наноконпозиционные и наноструктурные машиностроительные материалы и технологии их получения. Коллективная монография. / С.В. Авдейчик, В.В. Воропаев, Г.Н. Горбацевич, В.П. Иванов, А.В. Киричек, Г.А. Костюкович, В.И. Кравченко, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, А.А. Скаскевич, Д.Л. Соловьев, А.В. Струк, В.А. Струк, А.А. Рыскулов, Е.И. Эйсымонт; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2013. - 224 с.

Киричек Андрей Викторович

Доктор технических наук, профессор
Юго-Западный государственный университет, г. Курск
Проректор по НР
Тел.: (4712)50-48-14
E-mail: avk.57@ya.ru

Морозова Анна Валентиновна

Кандидат социологических наук,
докторант
Госуниверситет-УНПК, г. Орел
Тел.: (4862) 558602
E-mail: niotiostu@gmail.com

Василенко Юрий Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент
Директор ТИ Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Тел.: (4862) 555524
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

A. V. KIRICHEK, A. V. MOROZOVA, Yu. V. VASILENKO

ENTERPRISING PROJECT REALIZATION FOR SCIENTIFIC-METHODICAL SUPPORT OF MASTER'S ENGINEERING PROGRAMS

In the paper the experience in a purposeful development of theoretical-methodological support of the Master's program (by the example of the direction 151900.68 "Engineering and design support in mechanical engineering production" with the intake of research and educational staff of various colleges and research centers of Russia and near foreign countries (the former Soviet republics) in the form of an enterprising scientific-research project is analyzed.

Key words: *specialist, basic curriculum, magistracy.*

BIBLIOGRAPHY

1. Modelirovanie tehnologicheskikh processov abrazivnoj obrabotki. Monografija. / G.V. Barsukov, L.G. Vajner, Ju.V. Vasilenko, A.V. Voronkov, A.A. D'jakonov, A.M. Kozlov, A.V. Miheev, A.V. Morozova, P.P. Pereverzev, Ju.S. Stepanov; Pod red. Ju.S. Stepanova i A.V. Kiricheka - М.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. - 256 с.

2. Progressivnoe mashinostroitel'noe oborudovanie. Kollektivnaja monografija. / V.V. Erzhukov, A.G. Ivahnenko, E.O. Ivahnenko, A.V. Kirichek, V.V. Kuc, A.V. Morozova, L.A. Rybak, D.L. Solov'ev, M.A. Fedorenko, A.V. Chichvarin, V.P. Jaglinskij; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. - 248 s.
3. Jeffektivnye tehnologii dornovanija, protjagivaniija i deformirujushhe-rezhushhej obrabotki. Kollektivnaja monografija. / S.K. Ambrosimov, A.N. Afonin, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek, D.V. Krajnev, A.R. Lebedev, V.F. Makarov, A.V. Morozova, P.A. Norchenko, Ju.N. Poljanchikov, D.L. Solov'ev; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. - 328 s.
4. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki rezaniem. Kollektivnaja monografija. / S.I. Brusov, G.I. Dobrovolskij, D.Ju. Dubrov, V.P. Ivanov, A.V. Katunin, A.V. Kirichek, A.V. Morozova, O.V. Polohin, T.M. Sanina, Ju.A. Sergeev, V.A. Solodkov, A.E. Steshkov, A.S. Tarapanov, D.E. Tarasov, A.V. Handozhko, O.M. Shhebrov; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 304 s.
5. Progressivnye tehnologii nanosenija pokrytij. Monografija. / S.V. Avdejchik, A.S. Voroncov, V.M. Davydov, E.A. Zvjagina, V.P. Ivanov, V.I. Kravchenko, A.V. Kirichek, V. N. Korenev, E.A. Ledkov, A.V. Morozova, E.V. Ovchinnikov, M.F. Selemenev, A.A. Skaskevich, V.A. Struk, S.N. Himuhin, V. N. Hromov, E.I. Jejsymont; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 272 s.
6. Progressivnye mashinostroitel'nye tehnologii. Kollektivnaja monografija. / A.N. Afonin, E.V. Gaponenko, O.Ju. Erenkov, A.M. Ivanov, A.G. Ivahnenko, A.V. Kirichek, V.N. Li, Ju.A. Mamaev, A.V. Morozova, Ju.N. Platono-va, L.A. Rybak, V.A. Saninskij, E.V. Smolencev, N.A. Storchak, M.A. Teslina, S.N. Himuhin, Ju.L. Chigirinskij; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», Tom 1., 2012. - 334 s.
7. Kontrol' i diagnostika pri obespechenii kachestva mashinostroitel'nyh izdelij. Kollektivnaja monografija. / M.I. Abashin, A.A. Barzov, S.V. Barinov, A.L. Galinovskij, V.P. Ivanov, A.V. Kirichek, V.G. Li-sichkin, V.V. Markov, V.V. Mishin, A.V. Morozova, E.V. Paholkin, K.V. Podmaster'ev, D.L. Solov'ev, D.E. Tarasov; Pod red. A.V. Kiricheka i K.V. Podmaster'eva. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 320 s.
8. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i resursa pri izgotovlenii, sborke, remonte i vosstanovle-nii. Kollektivnaja monografija. / S.M. Beloborodov, Ju.A. Bondarenko, A.S. Vereshhaka, S.N. Grigor'ev, A.M. Ivanov, V.P. Ivanov, A.V. Kim, A.V. Kirichek, A.V. Konopljanik, E.S. Lukin, B.Ja. Mokrickij, A.V. Morozova, E.V. Ovchinnikov, M.V. Pesin, V.Ja. Prushak, Ju.A. Prushak; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 284 s.
9. Innovacionnoe razvitie i kadrovoe obespechenie sovremennogo mashinostroenija. Kollektivnaja monografija. / O.V. Avdejchik, V.M. Aleksandrov, A.V. Morozova, L.N. Nehorosheva, A.V. Struk, N.I. Fel'dman, N.V. Chigirinskaja; Pod red. A.V. Kiricheka i A.V. Morozovoj - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. - 226 s.
10. Progressivnye uzly i agregaty tehnologicheskikh mashin. Kollektivnaja monografija. / S.V. Bari-nov, A.A. Bukov, V.S. Vanin, S.S. Gutyrja, V.A. Danilov, V.P. Ivanov, V.V. Kavygin, A.V. Kirichek, V.P. Ko-rjachkin, A.V. Morozova, D.L. Solov'ev, D.E. Tarasov, M.P. Shishkarev; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 272 s.
11. Progressivnye mashinostroitel'nye tehnologii. Tom II. Kollektivnaja monografija. / S.V. Avdej-chik, A.N. Afonin, V.V. Voropaev, V.P. Ivanov, A.V. Kirichek, V.A. Liopo, L.V. Mihajlova, A.V. Morozova, E.V. Ovchinnikov, A.A. Ryskulov, A.A. Skaskevich, V.A. Struk, E.I. Jejsymont; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. - 336 s.
12. Progressivnye instrumenty i tehnologii shlifovanija. Kollektivnaja monografija. / D.V. Ardashev, Ju.V. Va-silenko, V.G. Gusev, A.A. D'jakonov, V.P. Ivanov, A.V. Morozov, A.V. Morozova, A.V. Tjuhta, P.S. Shva-girev; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2013. - 320 s.
13. Nanokompozicionnye i nanostrukturnye mashinostroitel'nye materialy i tehnologii ih polu-chenija. Kollektivnaja monografija. / S.V. Avdejchik, V.V. Voropaev, G.N. Gorbacevich, V.P. Ivanov, A.V. Kirichek, G.A. Kostjukovich, V.I. Kravchenko, A.V. Morozova, E.V. Ovchinnikov, A.A. Skaskevich, D.L. Solov'ev, A.V. Struk, V.A. Struk, A.A. Ryskulov, E.I. Jejsymont; Pod red. A.V. Kiricheka. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2013. - 224 s.

Kirichek Andrey Viktorovich

Doc. Sc. tech., Prof.
Southwest State University, Kursk
Prorector
Phone: (4712) 50-48-14
E-mail: avk.57@ya.ru

Morozova Anna Valentinovna

Can.Sc. soc.,
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Tel.: (4862) 558602
E-mail: niotiostu@gmail.com

Vasilenko Yuriy Valerievich

Can.Sc. tech.,
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Тел.: (4862) 555524
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.7.054: 629.7.05.67

В.В. СОЛДАТКИН

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ НЕПОДВИЖНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АЭРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

Рассматриваются конструктивная схема неподвижного пространственно распределенного многофункционального аэрометрического приемника и алгоритмическое обеспечение построенной на его основе системы воздушных сигналов вертолета.

Ключевые слова: вертолет, высотно-скоростные параметры, измерение, система, построение, неподвижный многофункциональный приемник, формирование, обработка информации, алгоритмы.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасности полета вертолета в инструментальном и автоматическом режимах пилотирования необходима информация о величине и составляющих вектора истинной воздушной скорости, углах атаки и скольжения, барометрической высоте и приборной скорости, определяющих динамику движения вертолета относительно окружающей воздушной среды.

Измерение указанных воздушных сигналов вертолета в диапазоне малых скоростей полета, когда приемники первичной аэрометрической информации находятся в створе вихревой колонны несущего винта, затрудняется значительными аэродинамическими искажениями, вносимыми индуктивным потоком несущего винта. При этом способность вертолета совершать движение вперед-назад, вправо-влево, на околонулевых скоростях и на режиме висения и связанный с этим пространственный характер воздушных потоков, воспринимаемых аэрометрическими приемниками, ограничивают использование на вертолетах традиционных для самолетов методов и средств измерения [1], обуславливают необходимость создания системы воздушных сигналов, построенной на новых принципах, максимально учитывающих специфику аэродинамики и динамики полета вертолета, удовлетворяющей современным требованиям по точности и надежности работы в реальных условиях эксплуатации [2, 3].

Одним из направлений расширения нижней границы рабочих скоростей полета является построение системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного пространственно-распределенного многофункционального аэрометрического приемника и использования для целей измерения информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [4].

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Анализ аэродинамического поля вблизи фюзеляжа вертолета показал, что вектор скорости V_{Σ} результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемый приемником аэрометрической информации, можно представить в виде трех составляющих $V_{\Sigma} = V + V_i + V_{\phi}$: стационарной составляющей V , обусловленной поступательным движением вертолета относительно воздушной среды, стационарной составляющей V_i скорости индуктивного потока и воздушного потока за счет тяги несущего винта, флуктуационной составляющей V_{ϕ} , обусловленной маховыми движениями лопастей и работой автомата

перекося и приводящей к пульсациям углов скола $\alpha_{ВК}$ и $\beta_{ВК}$ вихревой колонны в интервале $\pm 2 \dots 3$ угл. град. [5].

Так как круговые частоты ω_{ϕ} флуктуационных составляющих $V_{\phi i}$ вектора скорости V_{ϕ} кратны произведению $N_{л}\omega_{н}$ числа лопастей $N_{л}$ и угловой скорости вращения $\omega_{н}$ несущего винта, поэтому вектор флуктуационной скорости V_{ϕ} результирующего воздушного потока вихревой колонны может быть выделен или в значительной степени отфильтрован от составляющих V и V_i в каналах системы воздушных сигналов вертолета. Тогда в качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта можно использовать вектор скорости V_{Σ} результирующего воздушного потока вихревой колонны в виде геометрической суммы вектора V воздушного потока, формируемого при движении вертолета относительно окружающей среды, и вектора скорости V_i воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, т.е.

$$V_{\Sigma} = V + V_i = V_i - V_B, \tag{1}$$

где $V_B = -V$ – вектор истинной воздушной скорости вертолета.

ПОСТРОЕНИЕ НЕПОДВИЖНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АЭРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

Для восприятия информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта предложено [4] использовать неподвижный пространственно-распределенный многофункциональный аэрометрический приемник, конструктивная схема которого приведена на рисунке 1.

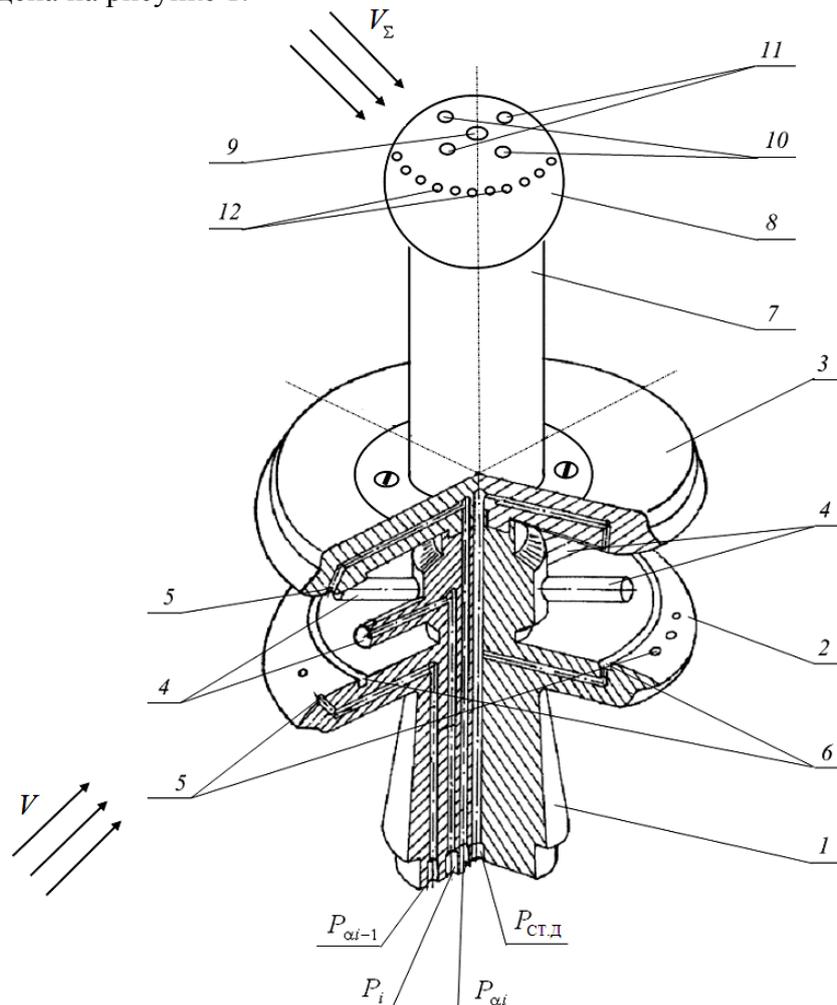


Рисунок 1 – Конструктивная схема неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

Неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник содержит многоканальный проточный аэрометрический приемник 1 [3], выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3. Между внутренними профилированными поверхностями экранирующих дисков 2 и 3 в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений P_i , определяющих скорость и угол скольжения β вектора скорости V воздушного потока, возникающего при продольном движении вертолета. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия 5 для забора давлений P_{ai} и P_{ai-1} , определяющих угол атаки α набегающего воздушного потока. На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления $P_{СТ.Д}$ набегающего воздушного потока.

Для получения информации о высотных параметрах вертолета в области малых и околонулевых скоростях полета, когда приемник 1 находится в створе вихревой колонны несущего винта вертолета, на наружной поверхности верхнего экранирующего диска 3 на цилиндрическом основании 7 установлен дополнительный аэрометрический приемник.

В целях повышения технологичности и обеспечения повторяемости характеристик многофункционального аэрометрического приемника дополнительный приемник выполнен в виде установленного на цилиндрическом основании 7 сферического приемника 8. На верхней поверхности сферического приемника 8 на оси симметрии расположено отверстие 9, являющееся приемником полного давления $P_{П\Sigma}$. В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{01} к оси симметрии на поверхности сферического приемника симметрично расположены отверстия 10, являющиеся приемниками давлений P_1 и P_2 . В плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии вертолета, симметрично под углом φ_{02} к оси симметрии на верхней поверхности сферического приемника расположены отверстия 11, являющиеся приемниками давлений P_3 и P_4 . Перпендикулярно оси симметрии сферического приемника на его поверхности по окружности расположены отверстия 12, являющиеся приемниками статического давления $P_{СТ\Sigma}$ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны.

В целях уменьшения аэродинамических искажений, вносимых установленным на цилиндрическом основании сферическим аэрометрическим приемником, дополнительный приемник может быть выполнен в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска, которая установлена непосредственно на его внешней поверхности [4].

ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ВИХРЕВОЙ КОЛОННЫ НЕСУЩЕГО ВИНТА

Используя векторные диаграммы скоростных напоров результирующего воздушного потока вихревой колонны в месте установки неподвижного многофункционального аэрометрического приемника при горизонтальном полете вертолета без скольжения (рис. 2, а) и при полете со скольжением (рис. 2, б), получено [6] соотношение для пространственного угла скола $\varphi_{П}$ вектора скорости V_{Σ} результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта с учетом углов $\alpha_{П0}$ и $\beta_{П0}$ начальной ориентации неподвижного аэрометрического приемника вида

$$\varphi_{П} = \arccos[\sin \varphi_1 \cos \alpha_{П0} \sin \varphi_2 \cos \beta_{П0} + \cos \varphi_1 \sin \alpha_{П0} \sin \varphi_2 \cos \beta_{П0} + \cos \varphi_2 \sin \beta_{П0}], \quad (2)$$

где φ_1 и φ_2 – проекции пространственного угла скола $\varphi_{П}$, определяющие угловое положение вектора скорости V_{Σ} результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта относительно осей неподвижного многофункционального аэрометрического приемника.

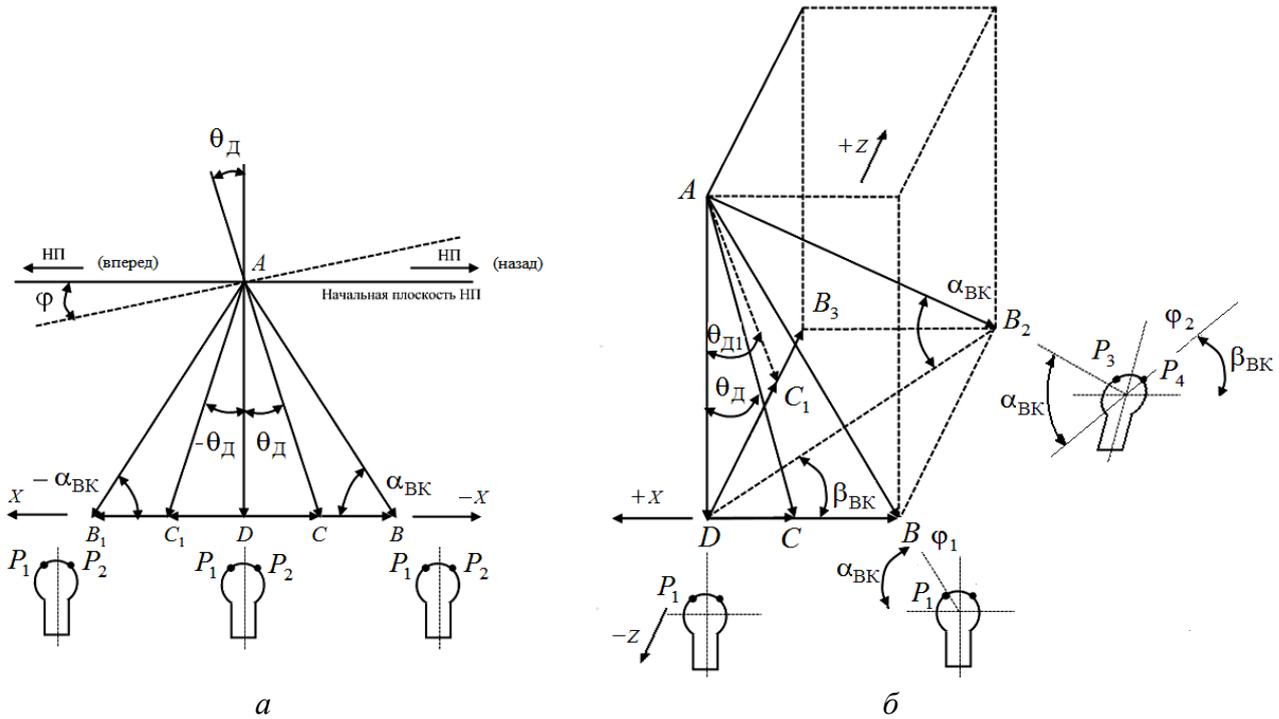


Рисунок 2 – Векторные диаграммы скоростных напоров результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта в месте установки неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

Для конкретного места установки неподвижного многофункционального аэрометрического приемника на фюзеляже вертолета составляющие V_{ix}, V_{iy}, V_{iz} вектора V_i в связанной системе координат можно описать уравнениями, приведенными в работе [7]:

$$V_{ix} = K_{ix} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}; \quad V_{iy} = K_{iy} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}; \quad V_{iz} = K_{iz} \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}, \quad (3)$$

где K_{ix}, K_{iy}, K_{iz} – безразмерные коэффициенты, которые определяются при летных испытаниях системы на конкретном вертолете; $\sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}} = |V_{i0}|$ – модуль вектора V_i скорости ин-

дуктивного потока на режиме висения ($V = 0$); G – текущий вес вертолета; $n_y = \frac{1}{g} \frac{d^2 H}{dt^2} - 1$ – нормальная перегрузка; ρ_H – плотность невозмущенного воздушного потока на данной высоте H ; F – площадь, ометаемая несущим винтом вертолета; χ – коэффициент заполнения диска несущего винта; $g = 9,80665$ – ускорение свободного падения.

Используя стандартные зависимости [8, 9], модуль V_Σ скорости и плотность ρ_Σ результирующего набегающего воздушного потока можно определить по полному $P_{\Pi\Sigma}$ и статическому $P_{C\Sigma}$ давлениям и температуре $T_{T\Sigma}$ заторможенного результирующего воздушного потока, воспринимаемой приемником температуры торможения

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{T\Sigma} \left[\left(\frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{C\Sigma}}{P_{C\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left(\frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{C\Sigma}}{P_{C\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143}}}, \quad (4)$$

$$\rho_{\Sigma} = \frac{P_{СТ\Sigma}}{287,05287 T_{Т\Sigma}} \left(\frac{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}}{P_{СТ\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143}, \quad (5)$$

где параметры, входящие в формулы (4) и (5), имеют размерности в единицах системы СИ.

Проекции вектора V_{Σ} результирующего воздушного потока на оси связанной с вертолетом системы координат определяются как:

$$V_{\Sigma x} = V_{\Sigma} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2; \quad V_{\Sigma y} = V_{\Sigma} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2; \quad V_{\Sigma z} = V_{\Sigma} \cos \varphi_2. \quad (6)$$

По давлениям P_1, P_2 и P_3, P_4 , воспринимаемым отверстиями 10 и 11 , расположенными на верхней поверхности дополнительного аэрометрического приемника 8 (см. рис. 2), можно определить углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора V_{Σ} результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта вертолета.

При выполнении дополнительного аэрометрического приемника в виде сферического тела (см. рис. 1) или полусферы, используя соотношения, приведенные в работе [10], связь давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 , воспринимаемых отверстиями 10 и 11 , можно представить в виде

$$\frac{P_1 - P_2}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{01} \sin 2\varphi_1; \quad \frac{P_3 - P_4}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{02} \sin 2\varphi_2, \quad (7)$$

где φ_{01} и φ_{02} – углы расположения отверстий для восприятия давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 .

Тогда углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора V_{Σ} результирующей скорости набегающего воздушного потока вихревой колонны, будут определяться соотношениями:

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} \right); \quad \varphi_2 = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} \right). \quad (8)$$

Поскольку неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник расположен на фюзеляже на определенном радиус-векторе $R(x, y, z)$ от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости V набегающего воздушного потока, обусловленное движением вертолета относительно окружающей среды. Проекция кинематически искаженного вектора будет определяться уравнениями

$$V_{kx} = V_x + (\omega_y z - \omega_x y); \quad V_{ky} = V_y + (\omega_z x - \omega_x z); \quad V_{kz} = V_z + (\omega_x y - \omega_y x). \quad (9)$$

где V_{kx}, V_{ky}, V_{kz} – проекции кинематически искаженного вектора V_k скорости набегающего воздушного потока в месте установки аэрометрического приемника; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат; x, y, z – координаты места установки аэрометрического приемника в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ПО ИНФОРМАЦИИ ВИХРЕВОЙ КОЛОННЫ НЕСУЩЕГО ВИНТА

По давлениям $P_{П\Sigma}, P_{СТ\Sigma}, T_{Т\Sigma}, P_1, P_2, P_3$ и P_4 воспринимаемым дополнительным аэрометрическим приемником определяются составляющие вектора истинной воздушной скорости, углы атаки и скольжения, абсолютная (барометрическая) высота, приборная скорость, температура наружного воздуха.

Используя соотношения (3) – (9), получены алгоритмы вычисления высотно-скоростных параметров вертолета по информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [4, 6]:

$$V_x = \frac{1}{2} V_{\Sigma} \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} \right) \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{П\Sigma} - P_{СТ\Sigma}} \right) - K_{ix} |V_{i0}| - (\omega_y z - \omega_x y);$$

$$\begin{aligned}
 V_y &= V_\Sigma \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{CT\Sigma}} \right) \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{CT\Sigma}} \right) \right] - \\
 &- K_{iy} |V_{i0}| - (\omega_z x - \omega_x z); \\
 V_z &= V_\Sigma \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{CT\Sigma}} \right) \right] - K_{iz} |V_{i0}| - (\omega_x y - \omega_y x); \\
 V_B &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} = \arcsin \frac{V_z}{V_B}; \\
 P_H &= P_{CT\Sigma} - K_P \frac{\rho_\Sigma V_\Sigma^2}{2}; \quad H_{abc} = H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad \rho_H = \frac{P_H}{RT_H}; \\
 T_H &= T_0 - \tau H; \quad V_{пр} = \sqrt{2gRT_0 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{дин}}{P_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]}; \quad P_{дин} = 0,5\rho_H V_B^2,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где P_0 и T_0 – абсолютное давление и температура воздуха на уровне моря ($P_0 = 101\,325$ Па, $T_0 = 288,15$ К); R и k – удельная газовая постоянная и показатель адиабаты для воздуха ($R = 287,05287$ Дж/(кг К), $k = 1,4$); $\tau = 0,0065$ К/м – температурный градиент; P_H , T_H и ρ_H – абсолютное давление, температура и плотность воздуха на высоте полета H ; $V_{пр}$ – приборная скорость; H – модуль вектора индуктивной скорости несущего винта вертолета на режиме висения; K_P – коэффициент, определяющий различие давлений P_H и $P_{CT\Sigma}$, который определяется при летных испытаниях.

Как показали исследования [11], угловое положение α_{BK} и β_{BK} вихревой колонны несущего винта вертолета при полете на малых скоростях можно представить в виде

$$\alpha_{BK} = f_{V_x}(V_x) \cong a_\alpha V_x; \quad \beta_{BK} = f_{V_z}(V_z) \cong a_\beta V_z, \tag{11}$$

где f_{V_x} , f_{V_z} и a_α , a_β – функции и коэффициенты, определяемые по результатам летных испытаний данного типа вертолета.

При этом для конкретного типа вертолета и места установки приемника, находящегося в зоне вихревой колонны, можно определить значения α_{BKmax} и α_{BKmin} , β_{BKmax} и β_{BKmin} , определяющие границы углового положения вихревой колонны в ортогональной и перпендикулярной ей плоскостях. Следовательно, как критерий нахождения неподвижного многоканального аэрометрического приемника в зоне вихревой колонны по значениям φ_1 и φ_2 можно использовать условие

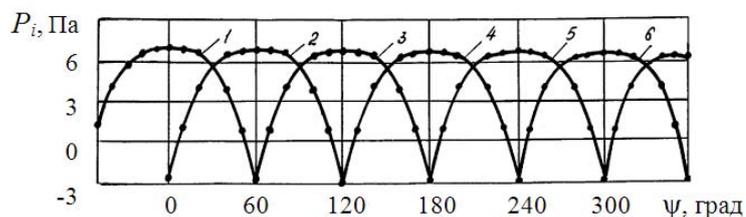
$$\alpha_{BKmin} < 90^\circ - \varphi_1 < \alpha_{BKmax}; \quad \beta_{BKmin} < 90^\circ - \varphi_2 < \beta_{BKmax}. \tag{12}$$

При выходе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника из зоны вихревой колонны не выполняются условия (11) и высотно-скоростные параметры вертолета определяются по давлениям, воспринимаемым многоканальным проточным аэрометрическим приемником.

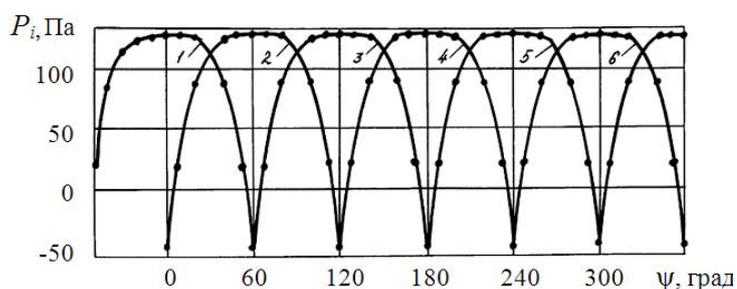
АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРОТОЧНОГО АЭРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

Как показано в работах [3, 12], угловые характеристики трубок полного давления многоканального проточного аэрометрического приемника симметричны относительно оси трубок (рис. 3). При этом угловые характеристики трубок полного давления с номерами $i-1$ и $i+1$ имеют точку пересечения, угловая координата которой совпадает с координатой максимума угловой характеристики i -трубки полного давления. Пересекающиеся ветви угловых

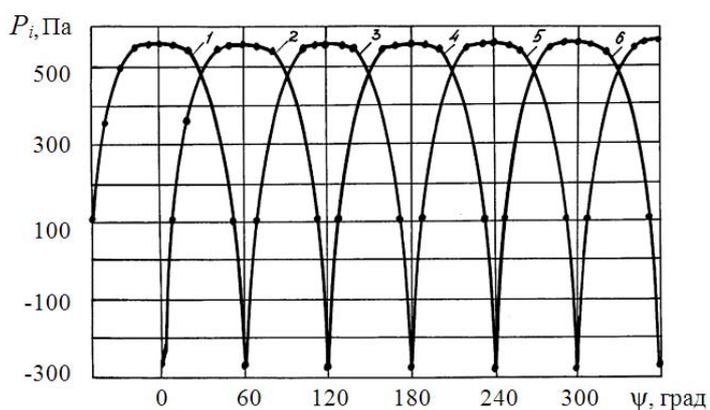
характеристик $i-1$ и $i+1$ трубок полного давления имеют участки достаточно большой угловой протяженностью, в пределах которых воспринимаемые давления P_{i-1} , P_i и P_{i+1} зависят от угла ψ направления воздушного потока, набегающего на неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник.



а



б



в

Рисунок 3 – Угловые характеристики неподвижного многоканального аэрометрического приемника

Указанные особенности угловых характеристик многоканального проточного аэрометрического приемника позволяют использовать следующий алгоритм обработки первичных информативных сигналов P_i для определения параметров вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета [3] при выходе неподвижного многофункционального приемника из зоны вихревой колонны несущего винта.

На первом этапе обработки массива давлений P_i определяется номер i -й трубки полного давления, в пределах которой локализовано направление вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета. За такую i -ю трубку полного давления, как следует из рисунка 3, принимается трубка, в которой значение измеренного давления P_i является наибольшим из всех трубок полного давления (номер трубки полного давления обозначаются $i = 0, 1, 2, \dots, n$). При этом принимается, что ось трубки полного давления под номером $i = 0$ совпадает с началом исходной системы координат отсчета угла направления ψ вектора V_B

истинной воздушной скорости вертолета.

По определенному номеру такой i -й трубки полного давления, в которой давление P_i наибольшее, определяется первое приближение ψ_{mi} угловой координаты направления вектора V_B воздушной скорости вертолета в соответствии с выражением

$$\psi_{mi} = \frac{360}{n} i. \quad (13)$$

где n – количество расположенных под одинаковым углом трубок полного давления (как правило $n = 6$ или $n = 8$).

На втором этапе обработки массива давлений P_i проводится предварительная оценка положения вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета. С этой целью сравниваются между собой давления P_{i-1} и P_{i+1} и проверяется, какое из неравенств выполняется

$$P_{i-1} > P_{i+1} \quad \text{или} \quad P_{i-1} < P_{i+1}, \quad (14)$$

где P_{i-1} и P_{i+1} – давления, измеряемые в трубках полного давления смежных с i -й трубкой.

В случае выполнения первого неравенства вектор V_B истинной воздушной скорости вертолета находится слева от i -й трубки полного давления, при выполнении второго условия – справа от i -й трубки. Указанным положениям соответствуют знаки «плюс» или «минус» отклонения $\Delta\psi$ действительного положения ψ вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета от его первого приближения ψ_{mi} .

Для определения точного значения угловой координаты ψ вектора V_B истинной воздушной скорости осуществляется преобразование реальной угловой характеристики трубок полного давления в другую систему координат путем введения безразмерной угловой координаты θ , начало которой совпадает с точкой пересечения смежных ветвей угловых характеристик $i-1$ и $i+1$ трубок полного давления, как показано на рисунке 4.

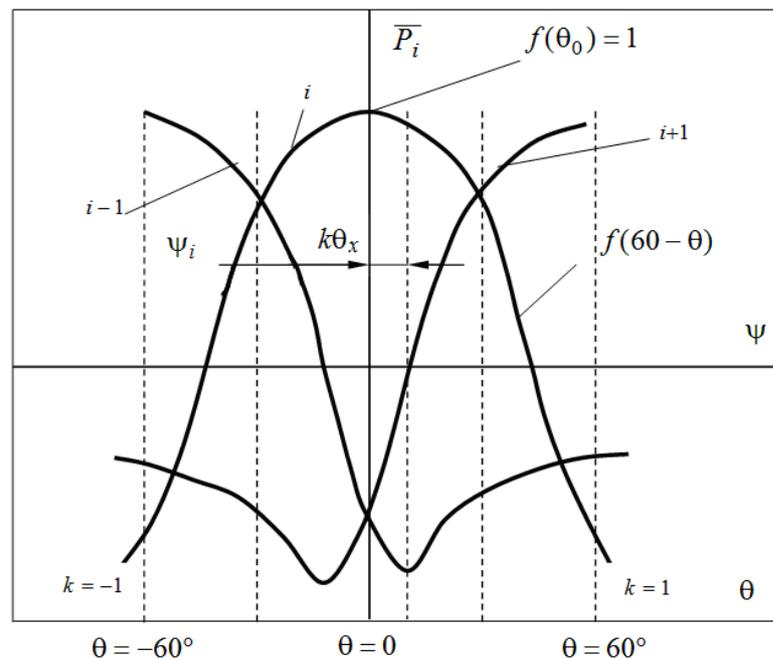


Рисунок 4 – Графическая интерпретация угловых координат трубок полного давления

Сущность такого преобразования сводится к замене углового отклонения $\Delta\psi$ угловой характеристики i -й трубки полного давления от реального направления ψ вектора V_B истин-

ной воздушной скорости вертолета на безразмерную координату θ_x , измерение которой осуществляется выбором шага t_0 введенной координатной сетки. Угловое положение θ i -й трубки полного давления относительно направления ψ вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета в новой системе координат определяется из решения одного из уравнений

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{f(\theta)}{f(-\theta)}; \quad \frac{P_{i-1}}{P_i} = \frac{f(-\theta)}{f(\theta)}, \quad (14)$$

где $f(\theta)$ и $f(-\theta)$ – аппроксимируются полиномами степени k , вычисленные по результатам предварительной градуировки неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника и описывающие соответственно правую и левую части угловой характеристики смежных $i-1$ и $i+1$ трубок полного давления в введенной системе координат.

Тогда второе приближение угловой координаты ψ вектора V_B истинной воздушной скорости вертолета в исходной системе координат определяется выражением:

$$\psi = \psi_{mi} \pm (\theta_{\max} - \theta_x)t_0, \quad (15)$$

где t_0 – координатный шаг сплайн-функции, реализующей аппроксимирующий полином $P_i = f(\theta)$ в безразмерной системе координат, например при $n = 6$ $t_0 = 60^\circ$.

Для определения модуля (величины) V_B вектора истинной воздушной скорости по полученному значению θ_x безразмерного углового положения i -й трубки полного давления вычисляется значение давления $P_{i\max}$, соответствующее совпадению направления вектора истинной воздушной скорости вертолета с осью i -й трубки полного давления. Это вычисление производится в соответствии со следующими зависимостями

$$P_{i\max} = \begin{cases} \frac{P_i f(\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} > P_{i+1}; \\ \frac{P_i f(-\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} < P_{i+1}. \end{cases} \quad (16)$$

По полученному значению $P_{i\max}$ определяется численное значение величины V_B истинной воздушной скорости вертолета с использованием выражения вида

$$V_B = \sqrt{\frac{2}{\rho_H} (P_{i\max} - P_H)} = \sqrt{\frac{2P_H T_0}{P_0 T_H} (P_{i\max} - P_H)}, \quad (17)$$

где ρ_H , P_H и T_H – плотность воздуха, статическое давление и абсолютная температура на высоте H .

Статическое давление P_H и абсолютная температура T_H на высоте H вертолета определяются по статическому давлению $P_{\text{Ст.Д}}$, воспринимаемому неподвижным проточным аэрометрическим приемником (рис. 1), и по показаниям бортового приемника температуры торможения в соответствии со стандартными зависимостями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренные алгоритмы формирования и обработки информации системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника позволяют определить высотно-скоростные параметры вертолета в широких рабочих диапазонах, в том числе в области малых и околонулевых скоростей, а также в широком диапазоне скоростей полета при выходе аэрометрического прием-

ника из зоны вихревой колонны несущего винта при изменении угла скольжения в пределах $\pm 180^\circ$.

Применение рассмотренной системы воздушных сигналов вертолета на различных классах вертолетов позволит повысить безопасность полета, эффективность пилотирования и боевого применения, обеспечить надежность работы системы в условиях возможных резких возмущений аэродинамического поля вертолета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Н.В. Системы измерения воздушных сигналов нового поколения / Н.В. Алексеев, Е.С. Вожаев, В.Г. Кравцов и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – №8. – С.31-36.
2. Козицин, В.К. Анализ принципов построения систем измерения воздушных сигналов вертолета / В.К. Козицин, Н.Н. Макаров, А.А. Порунов, В.М. Солдаткин // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – №10. – С. 2-13.
3. Патент № 2042137 РФ, МПК G01P 5/16. Многоканальный аэрометрический преобразователь / А.А. Порунов, В.Н. Олин, Н.С. Захарова // Заявл. 31.03.1993 г. Оpubл. 30.08.1995 г. Бюл. № 23.
4. Патент № 2427844 РФ, МПК G01P 5/14. Система воздушных сигналов вертолета / В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин, Н.А. Порунов, Н.Н. Макаров, В.И. Кожевников, В.П. Белов, Д.А. Истомин. // Заявл. 09.03.2010 г. Оpubл. 27.08.2011 г. Бюл. № 24.
5. Браверманн, А.С. Динамика вертолета. Предельные режимы полета / А.С. Браверманн, А.П. Вайнтруб. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
6. Солдаткин В.В. Методологические основы измерения высотно-скоростных параметров вертолета по аэрометрической информации вихревой колонны несущего винта / В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 51-56.
7. Козицин В.К. Алгоритмическое обеспечение системы воздушных сигналов вертолета на основе свободно ориентированного приемника давлений / В.К. Козицин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2006. – № 4. – С. 52-57.
8. ГОСТ 5212-74. Таблица аэродинамическая. Динамические давления и температура торможения воздуха для скорости от 10 до 4000 км/ч. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 239 с.
9. ГОСТ 4701-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 179 с.
10. Петунин, А.А. Методы и техника измерения параметров газового потока / А.А. Петунин. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.
11. Kaletka J. Evaluation of the Helicopter Low Airspeed System Lassie // Journal of American Helicopter Society. – 1983. – №4. Pp. 35-43.
12. Порунов, А.А. Всенаправленная система воздушных сигналов вертолета с неподвижным многоканальным аэрометрическим приемником / А.А. Порунов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Мехатроника, автоматизация, управление: Управление и информатика в аэрокосмических системах. – 2007. – №3. – С. 8-14.

Солдаткин Вячеслав Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»
Тел. +7(8432) 236-51-21
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

V.V. SOLDATKIN

ALGORITHMS OF FORMATION AND INFORMATION PROCESSING OF SYSTEM OF AIR SIGNALS OF THE HELICOPTER ON THE BASIS OF THE MOTIONLESS MULTIPURPOSE AEROMETRIC RECEIVER

The constructive scheme of the motionless spatially distributed multipurpose aerometric receiver and algorithmic providing the system of air signals of the helicopter constructed on its basis are considered.

Keywords: helicopter, high-rise and high-speed parameters, measurement, system, construction, motionless multipurpose receiver, formation, information processing, algorithms.

BIBLIOGRAPHY

1. Alekseev, N.V. Sistemy izmerenija vozdušnyh signalov novogo pokolenija / N.V. Alekseev, E.S. Vozhdaev, V.G. Kravcov i dr. // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2003. – №8. – S.31-36.
2. Kozicin, V.K. Analiz principov postroenija sistem izmerenija vozdušnyh signalov vertoletaja / V.K. Kozicin, N.N. Makarov, A.A. Porunov, V.M. Soldatkin // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2003. – №10. – S. 2-13.
3. Patent № 2042137 RF, MPK G01R 5/16. Mnogokanal'nyj ajerometricheskij preobrazovatel' / A.A. Porunov, V.N. Olin, N.S. Zaharova // Zajavl. 31.03.1993 g. Opubl. 30.08.1995 g. Bjul. № 23.
4. Patent № 2427844 RF, MPK G01R 5/14. Sistema vozdušnyh signalov vertoletaja / V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin, N.A. Porunov, N.N. Makarov, V.I. Kozhevnikov, V.P. Belov, D.A. Istomin. // Zajavl. 09.03.2010 g. Opubl. 27.08.2011 g. Bjul. № 24.
5. Bravermann, A.S. Dinamika vertoletaja. Predel'nye rezhimy poleta / A.S. Bravermann, A.P. Vajntруб. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 280 s.
6. Soldatkin V.V. Metodologicheskie osnovy izmerenija vysotno-skorostnyh parametrov vertoletaja po ajerometricheskoi informacii vihrevoj kolonny nesushhego vinta / V.V. Soldatkin // Izvestija vuzov. Aviaci-onnaja tehnika. –2010. – № 3. – S. 51-56.
7. Kozicin V.K. Algoritmicheskoe obespechenie sistemy vozdušnyh signalov vertoletaja na osnove svo-bodno orientirovannogo priemnika davlenij / V.K. Kozicin // Izvestija vuzov. Aviaci-onnaja tehnika. – 2006. – № 4. – S. 52-57.
8. GOST 5212-74. Tablica ajerodinamicheskaja. Dinamicheskie davlenija i temperatura tormozhenija voz-duha dlja skorosti ot 10 do 4000 km/ch. Parametry. – M.: Izd-vo standartov, 1974. – 239 s.
9. GOST 4701-81. Atmosfera standartnaja. Parametry. – M.: Izd-vo standartov, 1981. – 179 s.
10. Petunin, A.A. Metody i tehnika izmerenija parametrov gazovogo potoka / A.A. Petunin. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 332 s.
11. Kaletka J. Evaluation of the Helicopter Low Airspeed System Lassie // Journal of American Helicopter Society. – 1983. – №4. – Rp. 35-43.
12. Porunov, A.A. Vsenapravlenaja sistema vozdušnyh signalov vertoletaja s nepodvizhnym mnogokanal'nym ajerometricheskim priemnikom / A.A. Porunov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie: Upravlenie i informatika v ajerokosmicheskikh sistemah. – 2007. – №3. – S. 8-14.

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

The Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI

Cand. tech. sci., associate professor, associate professor «Devices and information and measuring systems»

Ph. +7 (843) 236-51-21

E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

В.С. ЗАХАРИКОВ

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ УГЛАМИ НАВЕДЕНИЯ

Рассмотрена система стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ) с диапазоном углов горизонтального и вертикального наведения более 180° . Выполнен анализ кинематических уравнений ССиН ЛВ. Получены условия устойчивости кинематических уравнений при любых углах горизонтального и вертикального наведения.

Ключевые слова: система стабилизации, гироскопия, кинематические соотношения, карданов подвес, оптико-электронная система.

При слежении за неподвижной или подвижной целью с борта подвижного объекта широко применяются системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ). Объектами, на которых устанавливается ССиН ЛВ, являются наземные подвижные объекты, морские суда, самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Требования к техническим характеристикам ССиН ЛВ зависят от задачи, которую решает ССиН ЛВ, и от объекта, на котором она установлена.

В последние годы возрос интерес к применению ССиН ЛВ на БПЛА. БПЛА имеют малые массу и габариты, обладают высокой маневренностью. Угловые движения БПЛА существенно зависят от ветровых нагрузок. Практически все существующие в настоящее время ССиН ЛВ, устанавливаемые на БПЛА, построены на основе двухосного карданова подвеса. Недостатком такого конструктивного решения является то, что при углах вертикального наведения близких к 90° не обеспечиваются стабилизация и сопровождение цели. Поэтому актуальной задачей является увеличение углов обзора ССиН.

Анализ известных схемотехнических решений построения ССиН ЛВ [2] показывает, что средством увеличения углов обзора ССиН в вертикальной плоскости является использование дополнительной (следающей) рамки, в которой установлен карданов подвес. В некоторых конструкциях ССиН используется две следящих рамки. Использование следящих рамок приводит к увеличению габаритов и массы системы, тем более что в рассмотренном случае в карданов подвес, как правило, монтируется вся оптико-электронная система. Указанное конструктивное решение используют в случаях, когда нет жестких ограничений на габариты и массу ССиН. Для построения малогабаритной ССиН ЛВ БПЛА используется стабилизация и управление отдельными оптическими элементами, например, зеркалами или призмами. В таких системах простое применение следящих рамок не решает задачу увеличения углов обзора ССиН.

В работе [1] предложена схема ССиН ЛВ (рис. 1), позволяющая обеспечить обзор по каналу горизонтального наведения $\pm 180^\circ$, по каналу вертикального наведения $\pm 123^\circ$.

Слежение за целью по каналу вертикального наведения осуществляется путем поворота внутренней рамки вокруг своей оси. Конструктивно углы обзора по каналу вертикального наведения ограничены перекрытием оптического луча снизу основанием 10 и наружной рамкой 9 (рис. 2). При этом оптическая система с фотоприёмным устройством 12 вынесена за пределы системы стабилизации и установлена на основании, что существенно уменьшает габариты системы в целом.

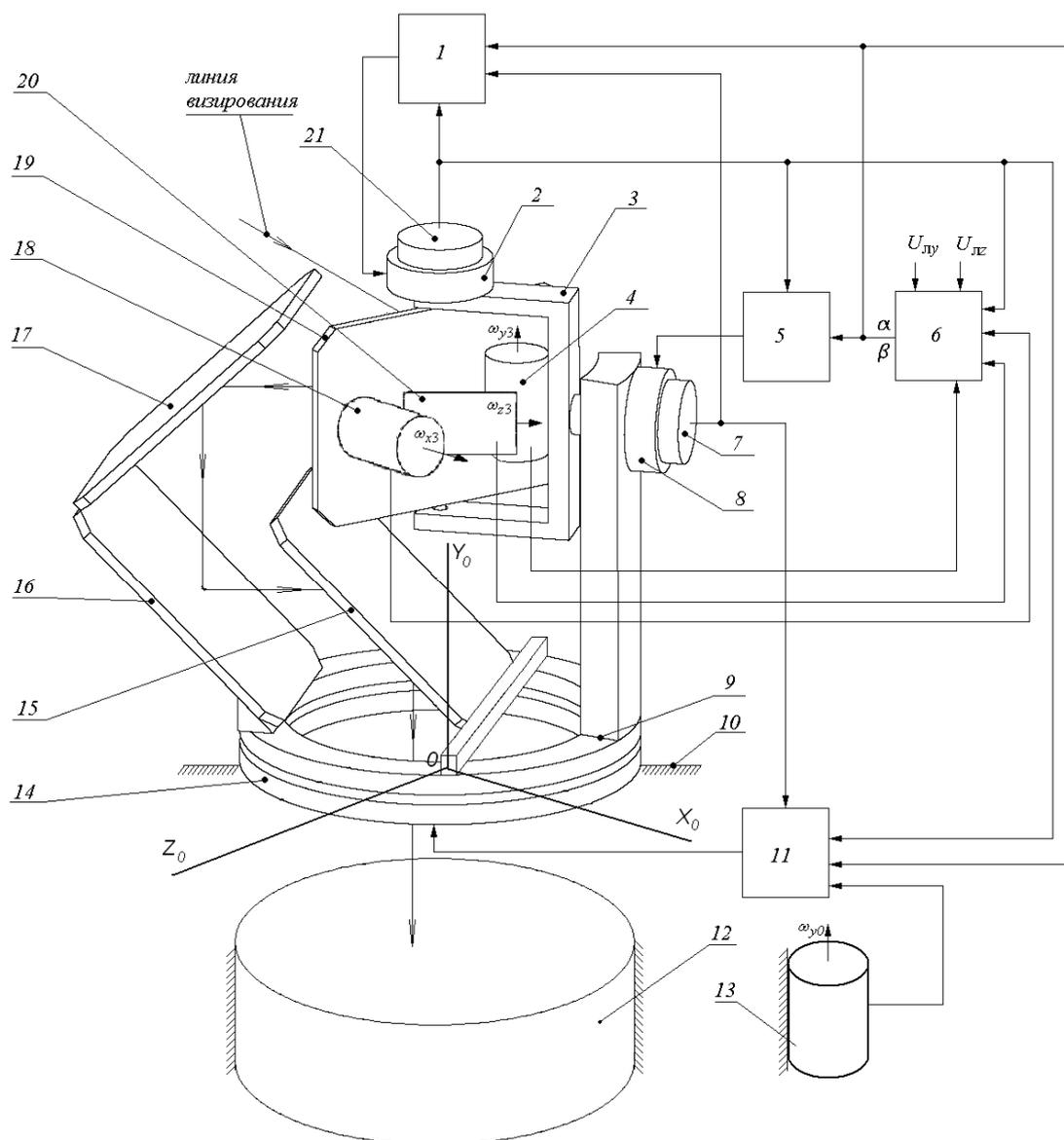


Рисунок 1 – Принципиальная кинематическая схема ССИН ЛВ

1, 5, 11 – блоки управления исполнительными двигателями; 2, 8, 14 – исполнительные двигатели;
 3 – внутренняя рамка; 4, 13, 18, 20 – датчики угловой скорости;
 6 – блок вычисления погрешностей стабилизации линии визирования: α – погрешность по азимуту;
 β – погрешность по углу места; 7, 21 – датчики угла; 9 – наружная рамка; 10 – основание;
 12 – фотоприемное устройство с объективом; 15, 16, 17 – зеркала, жестко связанные с наружной рамкой;
 19 – подвижное зеркало; $Ox_0Y_0Z_0$ – система координат, связанная с подвижным основанием

При заданных параметрах ССИН угол обзора в нижней полусфере $\Phi_{\text{доп}}$ определяется формулой (1), полученной из простых геометрических построений (рис. 3).

$$\Phi_{\text{доп}} = \arctg\left(\frac{R}{h}\right), \quad (1)$$

где R – радиус основания ССИН; h – высота расположения подвижного зеркала.

Для оценки $\Phi_{\text{доп}}$ построен эскиз конструктивной схемы рассматриваемой ССИН ЛВ. На основании значений $R=95$ мм и $h=146$ мм, эскиза построенной модели получим $\Phi_{\text{доп}}=33^\circ$.

В верхней полусфере углы обзора неограниченны и составляют $\pm 90^\circ$ (если исходным считать положение, при котором линия визирования направлена по оси вращения наружной рамки). Таким образом, углы обзора по каналу вертикального наведения составляют $\pm(90 + \Phi_{\text{доп}})^\circ$ или $\pm 123^\circ$.

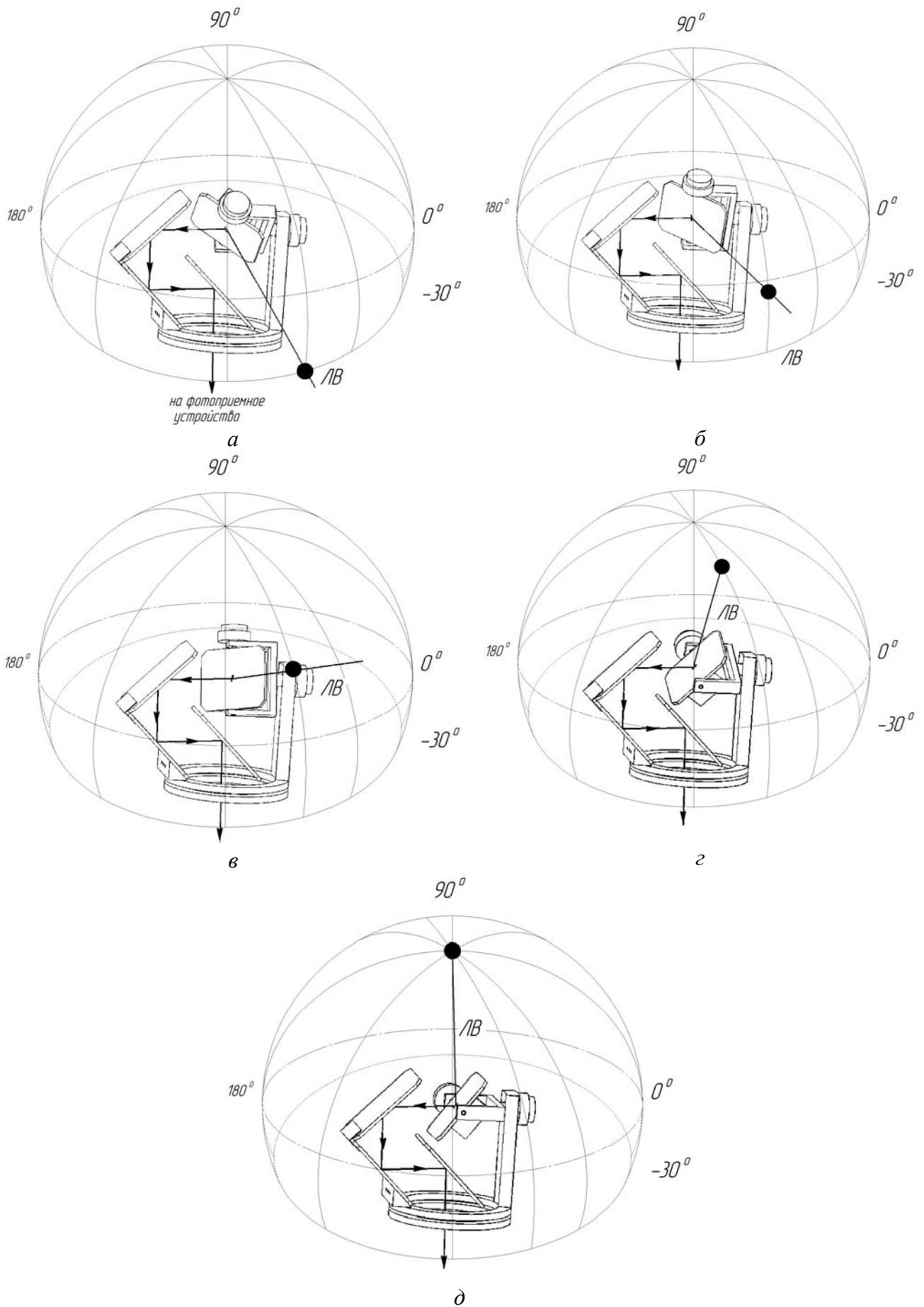


Рисунок 2 – Слежение за целью по каналу вертикального наведения при различных положениях линии визирования (а-д)

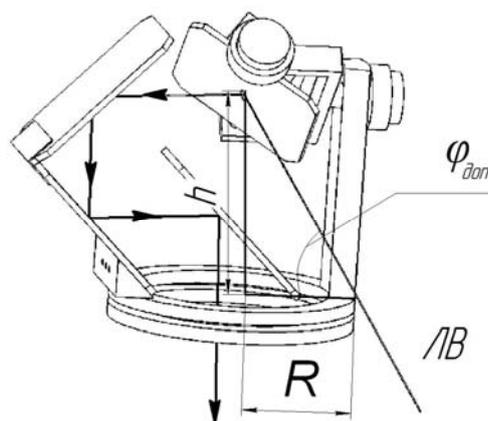


Рисунок 3 – К определению угла вертикального наведения в нижней полусфере при ограничении области обзора снизу основанием

Для исследования кинематики рассматриваемой ССиН введены следующие системы координат (СК) (рис. 4): $OX_0Y_0Z_0$ – СК, связанная с подвижным основанием, на котором установлена ССиН (базовая СК); $OX_1Y_1Z_1$ – СК, связанная с наружной рамкой; $OX_2Y_2Z_2$ – СК, связанная с внутренней рамкой; $OX_3Y_3Z_3$ – СК, связанная с подвижным зеркалом; $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$ – СК, связанная с оптической линией визирования; $OXYZ$ – СК, связанная с направлением на цель; φ_y (рад) – угол поворота СК $OX_1Y_1Z_1$ относительно $OX_0Y_0Z_0$ вокруг оси OY_0 (угол поворота наружной рамки); φ_z (рад) – угол поворота СК $OX_2Y_2Z_2$ относительно $OX_1Y_1Z_1$ вокруг оси OZ_1 (угол поворота внутренней рамки); φ_3 (рад) – угол поворота СК $OX_3Y_3Z_3$ относительно $OX_2Y_2Z_2$ вокруг оси OY_3 (угол поворота зеркала); $\varphi_{3\text{опт}} = 2\varphi_3$ (рад) – угол поворота СК $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$ относительно $OX_2Y_2Z_2$ вокруг оси OY_3 ; φ_A, φ_B – углы пеленга, определяющие направление на цель (направление линии визирования OX). Проекции векторов угловой скорости на связанные с ними оси обозначены, соответственно, $\omega_{xi}, \omega_{yi}, \omega_{zi}$ (рад/с) (при этом $i=0$ – для основания; $i=1$ – для наружной рамки; $i=2$ – для внутренней рамки; $i=3$ – для зеркала); $\omega_{\text{лy}}, \omega_{\text{лz}}$ (рад/с) – проекции угловой скорости цели на оси системы координат, связанной с направлением на цель; $\dot{\varphi}_3, \dot{\varphi}_y, \dot{\varphi}_z$ (рад/с) – относительные угловые скорости подвижного зеркала, внутренней рамки и наружной рамки, соответственно. При наведении на цель между СК $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$, связанной с оптической ЛВ, и СК $OXYZ$, связанной с направлением на цель, возникают углы рассогласования α, β и γ , при этом углы α и β являются погрешностями наведения ССиН по каналам азимута и угла места, соответственно.

Несложно показать, что кинематические уравнения движения рам карданова подвеса в случае отсутствия каких-либо погрешностей стабилизации и наведения описываются уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_y = \frac{\omega_{y3\text{опт}} - 2\dot{\varphi}_3 + (\omega_{x0}\cos\varphi_y - \omega_{z0}\sin\varphi_y)\sin\varphi_z}{\cos\varphi_z} - \omega_{y0}; \\ \dot{\varphi}_z = \frac{\omega_{z3\text{опт}} - \dot{\varphi}_y\sin 2\varphi_3\sin\varphi_z}{\cos 2\varphi_3} - \omega_{x0}(\text{tg} 2\varphi_3\cos\varphi_y\cos\varphi_z + \\ + \sin\varphi_y) - \omega_{y0}\text{tg} 2\varphi_3\sin\varphi_z - \omega_{z0}(\cos\varphi_y - \text{tg} 2\varphi_3\sin\varphi_y\cos\varphi_z). \end{cases} \quad (2)$$

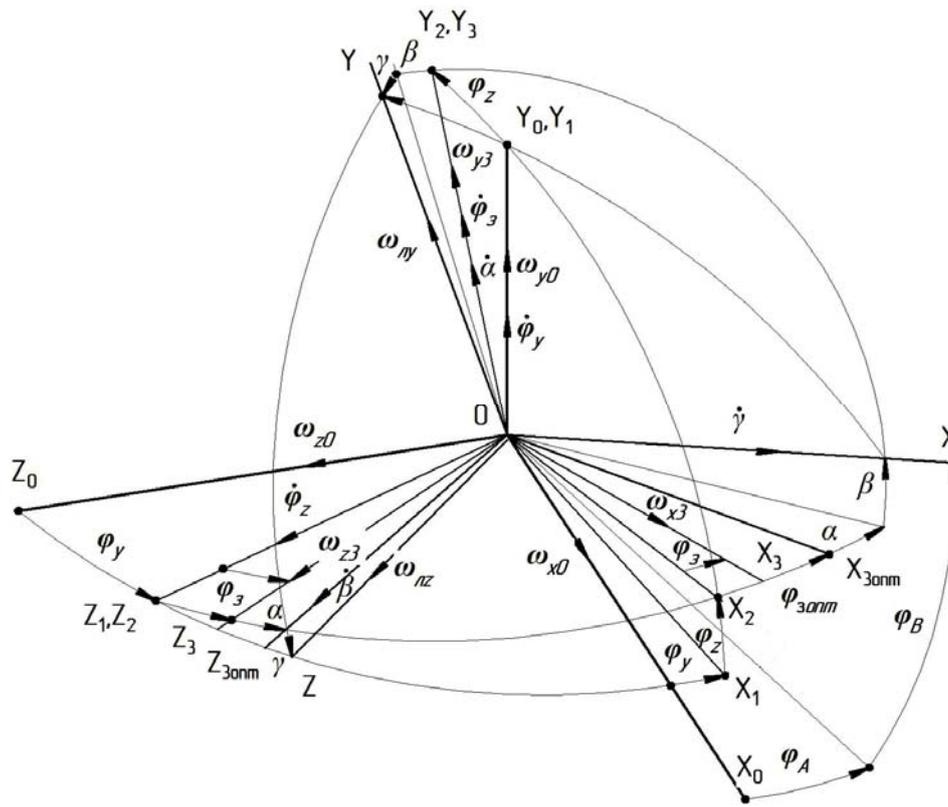


Рисунок 4 – Система координат ССН ЛВ

Уравнения системы (2) связывают три управляемые переменные ($\dot{\varphi}_y, \dot{\varphi}_z, \dot{\varphi}_3$), определяющие движение ССН ЛВ, с двумя задающими воздействиями $\omega_{y3\text{опт}}$ и $\omega_{z3\text{опт}}$, определяющими движение линии визирования. Таким образом, уравнения (2) не позволяют однозначно определить движение рам карданова подвеса (скоростей $\dot{\varphi}_y, \dot{\varphi}_z, \dot{\varphi}_3$) по двум задающим воздействиям ($\omega_{y3\text{опт}}, \omega_{z3\text{опт}}$).

При фиксированном положении зеркала 19 (рис. 1) рассматриваемая ССН ЛВ по принципу работы представляет собой известный двухосный карданов подвес [4-6] со всеми его достоинствами и недостатками. Ограничение работоспособности двухосной системы обусловлено тем, что при углах вертикального наведения, близких к 90° поворот по оси наружной рамки не меняет положения ЛВ. Уравнения (2), отражают это явление тем, что при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$ требуемая скорость $\dot{\varphi}_y$ вращения наружной рамки стремится к бесконечности.

Из второго уравнения выражения (2) следует, что для того, чтобы при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$ угловая скорость $\dot{\varphi}_y$ не стремилась к бесконечности, необходимо выполнение условия:

$$2\dot{\varphi}_3 = \omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0}\cos\varphi_y - \omega_{z0}\sin\varphi_y)\sin\varphi_z. \quad (3)$$

При постоянном выполнении условия (3) угол φ_3 может неограниченно нарастать (например, при наличии постоянной угловой скорости наведения по азимуту $\omega_{y3\text{опт}}$). Из второго уравнения системы (2) видно, что угол поворота φ_3 подвижного зеркала 19 ограничен и не должен выходить за пределы порядка $\pm 40^\circ$. Кроме того, угол φ_3 ограничен конструкцией ССН. Поэтому при $\varphi_z \rightarrow 0$ угол φ_3 должен стремиться к нулю (в принятой системе координат). С учетом данных требований изменим условие (3) и потребуем выполнения следующего кинематического соотношения:

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{[\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0}\cos\varphi_y - \omega_{z0}\sin\varphi_y)\sin\varphi_z] \sin^2\varphi_z - k\varphi_3 \cos^2\varphi_z}{2}, \quad (4)$$

где $k > 0$ – коэффициент, задающий отношение между максимальным углом φ_z и максимальной угловой скоростью $\dot{\varphi}_y$; коэффициент $k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z$ определяет «жесткость» электрической пружины на оси вращения зеркала 19, которая образуется двигателем 2, коэффициентом обратной связи $k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z$ и ДУ 21 (рис. 1).

Из выражения (4) видно, что при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$ второе слагаемое ($k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z$) стремится к нулевому значению, а первое слагаемое соответствует правой части выражения (3). При $\varphi_z \rightarrow 0$ второе слагаемое выражения (4) является доминирующим и (2) вырождается в условие (3). Таким образом, выполнение условия (4) обеспечивает работу при больших углах вертикального наведения φ_y путем поворота на угол φ_z и ограничение угла поворота зеркала φ_z при небольших значениях угла φ_y .

Подставляя во второе уравнение системы (2) $\dot{\varphi}_z$ из условия (4), приведем кинематические уравнения к виду:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_z = \frac{[\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}; \\ \dot{\varphi}_y = [\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \cos \varphi_z + k\varphi_3 \cos \varphi_z - \omega_{y0}; \\ \dot{\varphi}_z = \frac{\omega_{y3\text{опт}} - \dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos 2\varphi_3} - \omega_{x0} (\text{tg} 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \sin \varphi_y) - \\ - \omega_{y0} \text{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_z - \omega_{z0} (\cos \varphi_y - \text{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z). \end{cases} \quad (5)$$

Из системы уравнений (5) видно, что при выполнении условия (4) ограничения на углы поворота подвижных узлов φ_y , φ_z отсутствуют. В итоге система кинематических уравнений (2) имеет решение при любых углах поворота φ_y , φ_z .

Анализ уравнений (2) и (5) показал, что путем введения дополнительной оси вращения зеркала 19 (4) ССИН ЛВ обеспечивает широкий диапазон углов вертикального и горизонтального наведения.

Система уравнений (5) позволяет определить уравнения для формирования сигналов управления исполнительными двигателями ССИН ЛВ по сигналам ДУС и оптоэлектронной системы (уравнения обратной связи).

Проведем анализ устойчивости собственного движения ССИН по уравнениям связей (5). Поскольку исследуется собственное движение, внешние воздействия не рассматриваются ($\omega_{y3\text{опт}} = \omega_{z3\text{опт}} = 0$, $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0} = 0$). Тогда уравнения (5) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_z = -\frac{k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}; \\ \dot{\varphi}_y = k\varphi_3 \cos \varphi_z; \\ \dot{\varphi}_z = -\frac{k\varphi_3 \text{tg} 2\varphi_3 \sin 2\varphi_z}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Анализ устойчивости проведем прямым методом Ляпунова [7]. Примем функцию Ляпунова в виде положительно определенной квадратичной формы

$$V = m\varphi_z^2 + \varphi_y^2 + \varphi_z^2, \quad (7)$$

где m – положительный весовой коэффициент.

Согласно теореме Ляпунова система будет устойчива в том случае, если производная функции (7) соответствует условию

$$\frac{dV}{dt} < 0. \quad (8)$$

Производная функции Ляпунова (7) имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = 2m\dot{\varphi}_3\varphi_3 + 2\dot{\varphi}_y\varphi_y + 2\dot{\varphi}_z\varphi_z . \quad (9)$$

Подставив в производную (9) значения производных от переменных состояния из (6) получим уравнение, зависящее только от переменных состояния:

$$\frac{dV}{dt} = -mk\varphi_3^2\cos^2\varphi_z - k\varphi_3\varphi_z\operatorname{tg}2\varphi_3\sin2\varphi_z + 2k\varphi_3\varphi_y\cos\varphi_z . \quad (10)$$

Проведем анализ производной функции Ляпунова (10), учитывая, что в общем случае углы поворота карданова подвеса определены в области горизонтального наведения $\pm 180^\circ$ (φ_y) и вертикального наведения $\pm 123^\circ$ (φ_z , ввиду ограничения обзора основанием снизу). Первое слагаемое будет меньше или равно нулю при любых значениях углов. Второе слагаемое будет меньше или равно нулю при $|\varphi_3| \leq 45^\circ$ и $|\varphi_z| \leq 90^\circ$. В рассматриваемой конструкции первое условие будет выполняться всегда. Второе условие может нарушаться, т.к. угол φ_z может быть и больше, чем 90° . Третье слагаемое может иметь любой знак. Таким образом, для устойчивости системы необходимо выполнение условия

$$m\varphi_3^2\cos^2\varphi_z > \varphi_3(2\varphi_y\cos\varphi_z - \varphi_z\operatorname{tg}2\varphi_3\sin2\varphi_z) . \quad (11)$$

Поскольку величина коэффициента m в функции Ляпунова может быть выбрана сколь угодно большой, а при $\varphi_3 = 0^\circ$ или $\varphi_z = 90^\circ$ обе части неравенства (11) будут равны нулю, условие абсолютной устойчивости выполняется.

Таким образом, при выбранном способе управления дополнительной осью вращения зеркала 19 ССН ЛВ обеспечивается устойчивость кинематических уравнений в указанном выше диапазоне углов горизонтального и вертикального наведения ($\pm 123^\circ$ по углу места и $\pm 180^\circ$ по азимуту).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захариков, В.С. Система стабилизации и наведения линии визирования с увеличенными углами обзора / В.С. Захариков, В.В. Савельев, В.А. Смирнов // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 4. – С. 4-11.
2. Захариков, В.С. Системы стабилизации и наведения линии визирования, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью / В.С. Захариков, В.А. Смирнов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – С. 80-86.
3. Ишлинский, А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А.Ю. Ишлинский. – М.: 1976. – 670 с.
4. Пельпор, Д.С. Гироскопические системы / Д.С. Пельпор. – Ч.1. – М.: Высшая школа, 1971. – 567 с.
5. Пельпор, Д.С. Гироскопические системы / Д.С. Пельпор. – Ч.2. Гироскопические приборы и системы. – М.: Высш. шк., 1988. – 424 с.
6. Ривкин, С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании / С.С. Ривкин. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
7. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

Захариков Вячеслав Сергеевич,

Тульский государственный университет, г. Тула
аспирант кафедры «Приборы и биотехнические системы»
E-mail: zaharikovvs@mail.ru

V.S. ZAKHARIKOV

SYSTEM STABILIZATION AND GUIDANCE A LINE OF SIGHT WITH INCREASING ANGLES GUIDANCE

System stabilization and guidance a line of sight (SS&G LOS) with horizon angle and vertical angle of guidance more 180 degrees was considered at this article. Also analysis kinematic equation of SSaG SL was executed. Conditions of stability kinematic equations was derived for any horizon angle and vertical angle of guidance.

Keywords: *system stabilization, gyroscopy, kinematic equation, gimbal suspension, optic-electronic system.*

BIBLIOGRAPHY

1. Zaharikov, V.S. Sistema stabilizacii i navedenija linii vizirovanija s uvelichennymi uglami ob-zora / V.S. Zaharikov, V.V. Savel'ev, V.A. Smirnov // Girokopija i navigacija. – 2011. – № 4. – S. 4-11.
2. Zaharikov, V.S. Sistemy stabilizacii i navedenija linii vizirovanija, vypuskaemye otechestvennoj i zarubezhnoj promyshlennost'ju / V.S. Zaharikov, V.A. Smirnov // Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki. – 2011. – S. 80-86.
3. Ishlinskij, A.Ju. Orientacija, giroskopy i inercial'naja navigacija / A.Ju. Ishlinskij. – M.: 1976. – 670 s.
4. Pel'por, D.S. Girokopicheskie sistemy / D.S. Pel'por. – Ch.1. – M.: Vysshaja shkola, 1971. – 567 s.
5. Pel'por, D.S. Girokopicheskie sistemy / D.S. Pel'por. – Ch.2. Girokopicheskie pribory i sistemy. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 424 s.
6. Rivkin, S.S. Stabilizacija izmeritel'nyh ustrojstv na kachajushhemsja osnovanii / S.S. Rivkin. – M.: Nauka, 1978. – 320 s.
7. Besekerskij, V.A. Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.A. Besekerskij, E.P. Popov. – SPb.: izd-vo «Professija», 2003. – 752 s.

Zakharikov Vyacheslav Sergeevich

Tula State University, Tula

graduate student of "Devices and biotechnical systems"

E-mail: zaharikovvs@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

Предложен способ создания оптимальной структуры многофункционального беспроводного датчика с автономным питанием на основе алгоритма поиска кратчайших путей по обобщенному показателю, учитывающему энергопотребление, стоимость и техническую совместимость функциональных узлов. На конкретном примере показан выигрыш в сокращении структурной избыточности на 35 % и по обобщенному показателю – в 2,35 раза. Представлена техническая реализация основных функциональных узлов датчика.

Ключевые слова: беспроводный датчик с автономным питанием, энергопотребление, граф, алгоритм Дейкстры.

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования возникновения наледи на дорогах Федеральным дорожным агентством предписано производить измерения следующих параметров метеорологических условий и состояния поверхности дорожного покрытия [1]: температуры и относительной влажности воздуха, температуры поверхности дорожного покрытия и под ней на глубине 4-7 см, влажности поверхности дорожного покрытия и других.

Определение температуры и относительной влажности воздуха осуществляется с помощью автоматических дорожных метеорологических станций, расположенных рядом с дорогой. Параметры состояния дорожного покрытия определяются беспроводными датчиками с автономным питанием (БДАП), устанавливаемыми в верхний слой дорожного полотна. Основными функциональными элементами БДАП (рис. 1) являются: чувствительный элемент (ЧЭ), преобразующий параметры среды в электрический сигнал; масштабирующий блок (МБ), приводящий выходной сигнал с ЧЭ к стандартному уровню для дальнейшего преобразования в цифровую форму; аналого-цифровой преобразователь (АЦП); блок обработки данных (БОД), преобразующий параллельный код с выхода АЦП в последовательный код, передатчик (ПРД) и антенна (А).

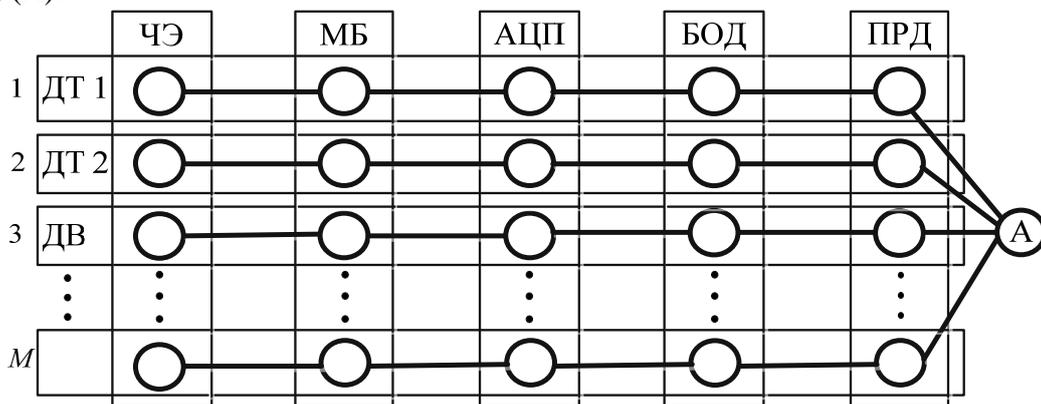


Рисунок 1 – Структурная схема БДАП для измерения нескольких параметров
 ДТ – датчик температуры; ДВ – датчик влажности

Замена элементов электропитания БДАП является весьма трудоемким мероприятием, в связи с чем возникает задача увеличения их срока службы. Возможные решения указанной задачи связаны с уменьшением энергопотребления датчиков с автономным питанием [2], применением управляемого режима работы [3] и снижением их структурной избыточности. Исследованию последнего решения посвящена данная работа.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА

Учитывая монотонность (медленное изменение во времени) параметров состояния дорожного покрытия, появляется возможность их периодического измерения, и предлагается

для снижения энергопотребления использовать одни и те же однотипные структурные элементы БДАП в функциональных схемах нескольких датчиков, осуществляя их последовательную коммутацию (рис. 2).

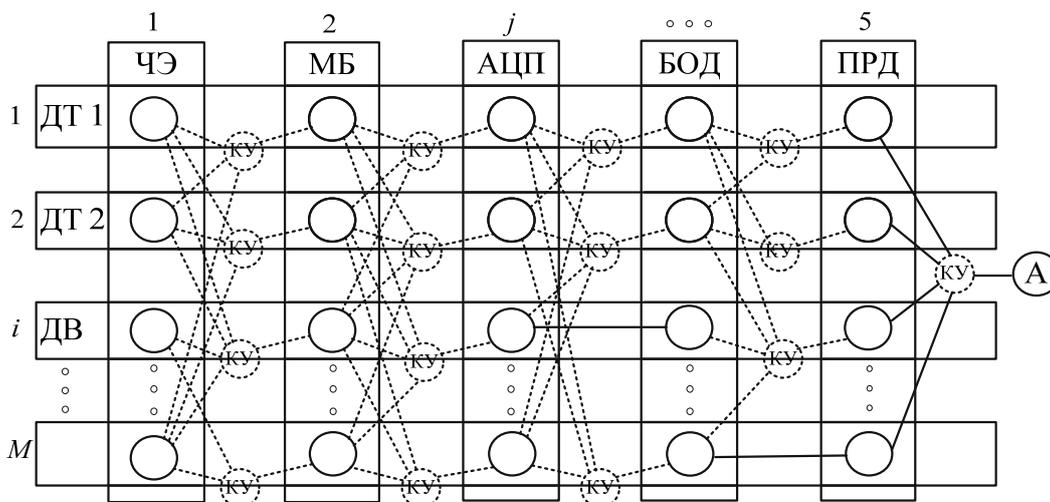


Рисунок 2 – Граф многофункционального БДАП, совмещенный с его структурной схемой

Для определения оптимальной структуры получаемого таким образом многофункционального БДАП воспользуемся методами теории графов [4].

Поставим в соответствие вершинам графа X_{ij} (i вершина в j блоке) множество структурных элементов датчиков (КУ – коммутационный узел), ребрам – возможные связи между ними, а весам вершин (граф со взвешенными вершинами) – обобщенный показатель, определяемый методом идеальной точки [5]:

$$k_{ij} = \sqrt{(E_{ij}^{\text{норм}} - E_{ij}^{\text{ид}})^2 + (S_{ij}^{\text{норм}} - S_{ij}^{\text{ид}})^2 + (T_{ij}^{\text{норм}} - T_{ij}^{\text{ид}})^2}, \quad (1)$$

где i – измеряемый параметр ($i = 1 \dots M$); M – максимальное число параметров; j – номер функциональных блоков в структуре многофункционального БДАП ($j = 1 \dots 5$); $E_{ij}^{\text{норм}}$, $S_{ij}^{\text{норм}}$, $T_{ij}^{\text{норм}}$ – нормированные значения энергопотребления, стоимости и технической совместимости структурного элемента i -го параметра j -го блока соответственно; $E_{ij}^{\text{ид}}$, $S_{ij}^{\text{ид}}$, $T_{ij}^{\text{ид}}$ – идеальные значения указанных характеристик ($E_{ij}^{\text{ид}} = 0$, $S_{ij}^{\text{ид}} = 0$, $T_{ij}^{\text{ид}} = 1$).

Нормирование значений энергопотребления и стоимости может быть осуществлено следующим образом:

$$E_{ij}^{\text{норм}} = c_E E_{ij} - d_E, \quad S_{ij}^{\text{норм}} = c_S S_{ij} - d_S,$$

где E_{ij} – энергопотребление i -го параметра j -го блока; S_{ij} – стоимость i -го параметра j -го блока;

$c_E = \frac{1}{E_{\max} - E_{\min}}$ и $c_S = \frac{1}{S_{\max} - S_{\min}}$ – масштабирующие коэффициенты;

$d_E = \frac{E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$ и $d_S = \frac{S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}$ – коэффициенты сдвига; E_{\max} и S_{\max} – наибольшие энергопотребление и стоимость i -го параметра j -го блока; E_{\min} и S_{\min} – наименьшие энергопотребление и стоимость i -го параметра j -го блока.

Значение технической совместимости находится экспертным путем в диапазоне $T_{ij} \in (0;1]$ и определяет соответствие двух сопрягаемых структурных элементов j -го и $(j-1)$ -го блоков по ряду важных технических характеристик, таких как точность, чувствительность,

разрядность, сложность монтажа и другие. В случае полной совместимости $T_{ij}=1$, а при невозможности сопряжения двух структурных элементов в графе будет отсутствовать ребро между ними.

Значения технической совместимости взаимодействующих структурных элементов многофункционального БДАП для случая измерения четырех параметров ($M=4$) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения технической совместимости структурных элементов

чЭ	АИ	1	2	3	4	АЦП	БОД	1	2	3	4
	1	1	0,8	0,8	0		1	1	1	0	0
	2	0,9	1	0,7	0		2	1	1	0	0
	3	0	0,7	1	0		3	0	1	1	0
	4	0	0	0	1		4	0	0	0	1
АИ	АЦП	1	2	3	4	БОД	ПРД	1	2	3	4
	1	1	0,9	0,7	0		1	1	1	0	0
	2	1	1	0	0		2	0,9	1	0	0
	3	0	0	1	0		3	0	0	1	0
	4	0	0	0,8	1		4	0	0	1	1

С учетом известных значений k_{ij} обобщенного показателя (1) структурных элементов БДАП (приведены в вершинах графа на рис. 3) для оптимизации его структуры используем алгоритм Дейкстры [4]. Найденные на его основе оптимальные маршруты (рис. 3) позволили устранить структурную избыточность многофункционального БДАП (рис. 2), а их анализ показал, что между функциональными элементами датчика включены КУ (вершины, у которых $j = 2n, n = 1, 2, \dots$), имеющие только один вход. Их использование является нецелесообразным и требует исключения из графа (структурной схемы БДАП) на этапе построения оптимальных маршрутов, а алгоритм Дейкстры – соответствующей модификации (рис. 4).

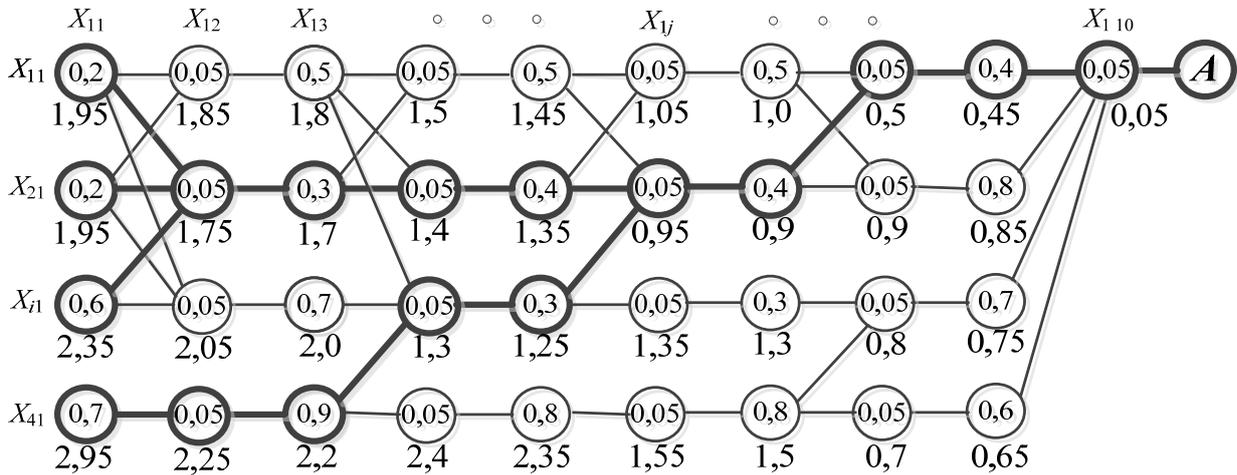


Рисунок 3 – Граф многофункционального БДАП с оптимальными маршрутами

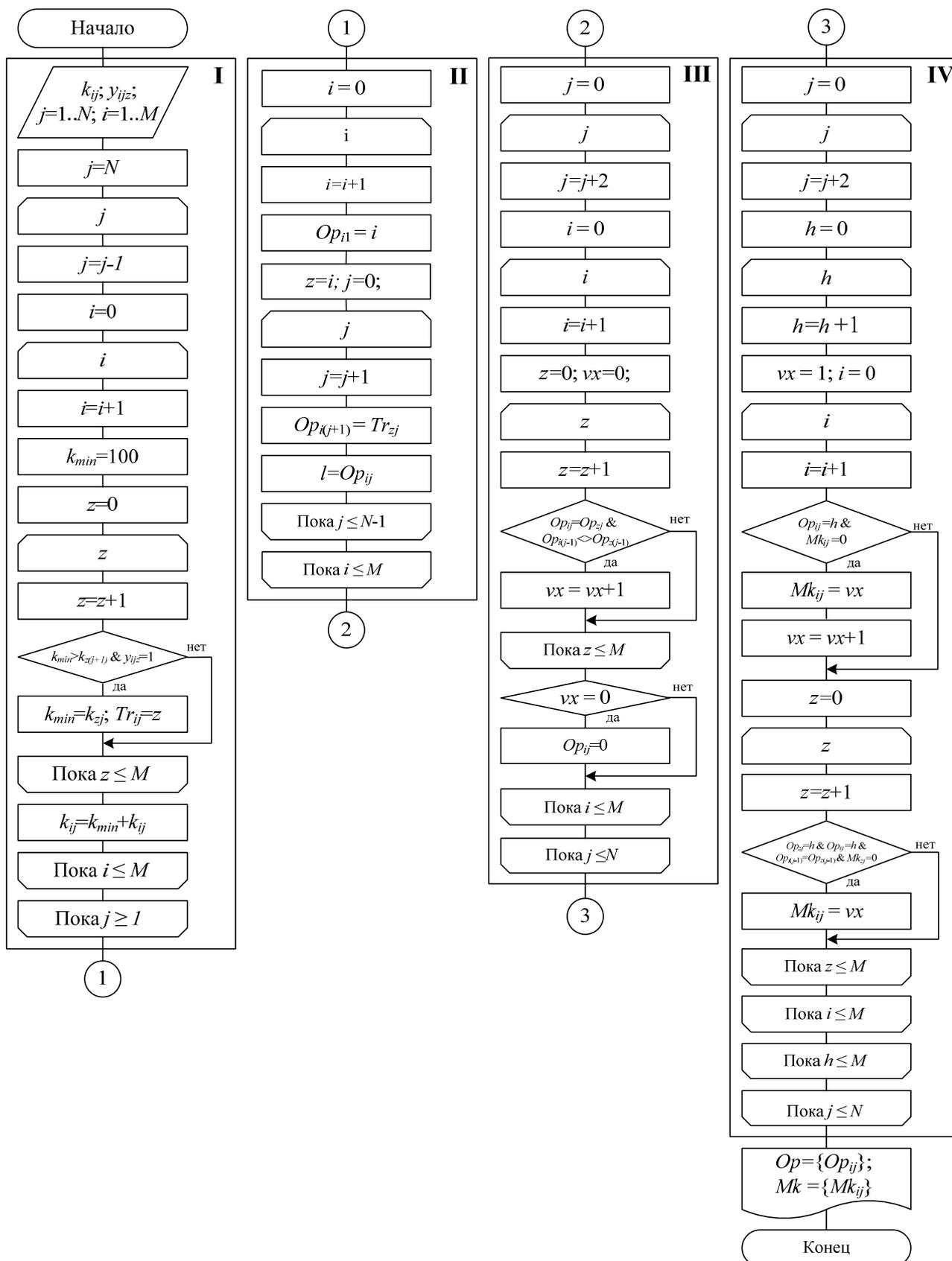


Рисунок 4 – Алгоритм оптимизации структуры многофункциональных БДАП

Исходными данными для работы модифицированного алгоритма являются:

– $K = \{k_{ij}\}$ – матрица весов вершин, где k_{ij} – значения обобщенного показателя (1)

приведены в его вершинах; $i = 1 \dots M$ – номер узла (измеряемого параметра) на j -м шаге; M – максимальное число узлов (параметров); $j = 1 \dots N$ – номер шага;

– $Y = \{y_{ijz}\}$ – матрица смежности, где y_{ijz} – принимает значения 0 (нет связи) или 1 (связь есть) между вершинами шагов j и $(j-1)$, где i и z – порядковые номера узлов на шагах.

К основным этапам функционирования алгоритма (рис. 4) относятся:

I – получение матрицы маршрутов $Tr = \{Tr_{ij}\}$, обеспечивающих минимальные значения весов пути для всех вершин графа;

II – восстановление массива оптимальных маршрутов $Op = \{Op_{ij}\}$;

III – удаление узлов графа, соответствующих КУ с одним входом;

IV – формирование матрицы коммутаций $Mk = \{Mk_{ij}\}$, определяющей режимы работы коммутационных узлов.

Первые два этапа соответствуют выполнению классического алгоритма поиска кратчайших путей [4], а реализация третьего позволяет получить оптимальные маршруты Op , не содержащие КУ с одним входом. Так, для рассматриваемого случая (рис. 3) результатом работы данного этапа алгоритма является исключение узлов $X_{12}, X_{32}, X_{42}, X_{13}, X_{33}, X_{14}, X_{24}, X_{34}, X_{44}, X_{15}, X_{45}, X_{16}, X_{36}, X_{46}, X_{17}, X_{37}, X_{47}, X_{18}, X_{28}, X_{38}, X_{48}, X_{29}, X_{39}, X_{49}, X_{110}$ (рис. 5), что указывает на сокращение структурной избыточности приблизительно на 35 %.

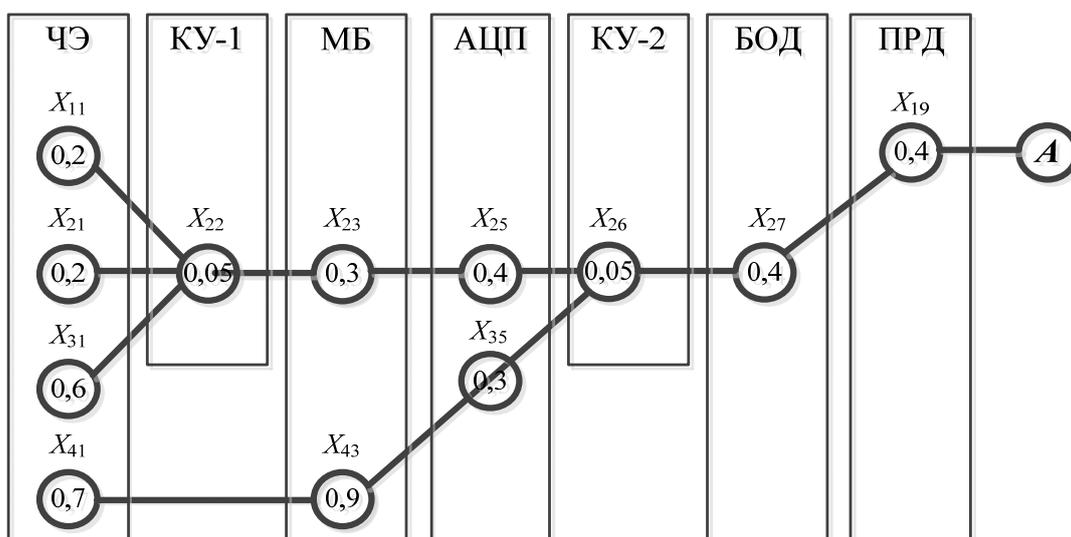


Рисунок 5 – Граф многофункционального БДАП без КУ с одним входом

На четвертом этапе формируется матрица коммутаций (ее нулевые строки матрицы соответствуют некоммутационным функциональным элементам – ЧЭ, МБ, АЦП, БОД и ПРД), в соответствии с которой может быть определена таблица динамической адресации (рис. 6).

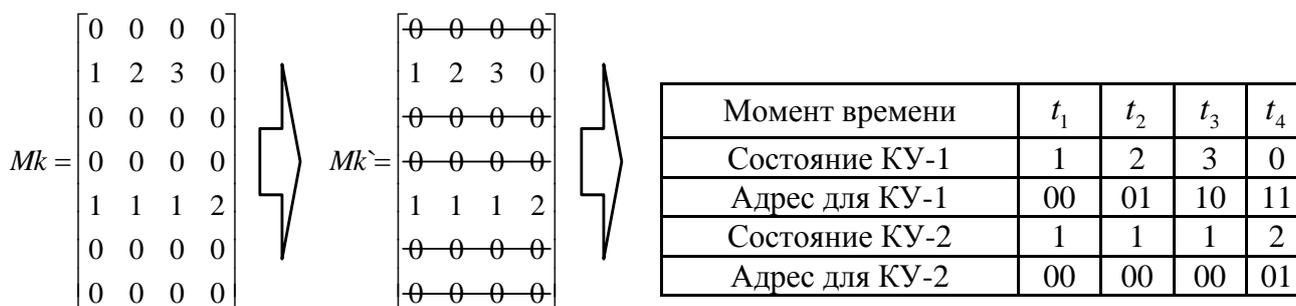


Рисунок 6 – Принцип формирования таблицы динамической адресации КУ на основе матрицы коммутации

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Реализация управления КУ на основе полученной таблицы динамической адресации возможна на микросхемах памяти серии K537, изготовленных по КМДП-технологии (рис. 7). Их общими свойствами являются: единое напряжение питания 5 В, ТТЛ-уровни входных и выходных сигналов, выход с тремя состояниями, высокая помехоустойчивость, небольшое энергопотребление, причем при хранении почти на три порядка меньше, чем при записи данных.

Коммутационные узлы (рис. 5) используются для коммутации аналоговых (КУ-1) и цифровых (КУ-2) сигналов. При выборе коммутатора аналоговых сигналов (КУ-1) предпочтение отдается устройствам на основе МДП-транзисторов (КМДП) [6–8]. Большой выбор устройств коммутации цифровых сигналов (КУ-2), называемых мультиплексорами, представлен в серии КР1533.

Учитывая необходимость (при $M > 4$) использования большого числа КУ, особого внимания заслуживает микросхема K561КП1. Она представляет собой четырехканальный мультиплексор для коммутации как аналоговых, так и цифровых сигналов. Для уменьшения сопротивления включенного канала коммутации соответствующие выводы включают параллельно (рис. 7).

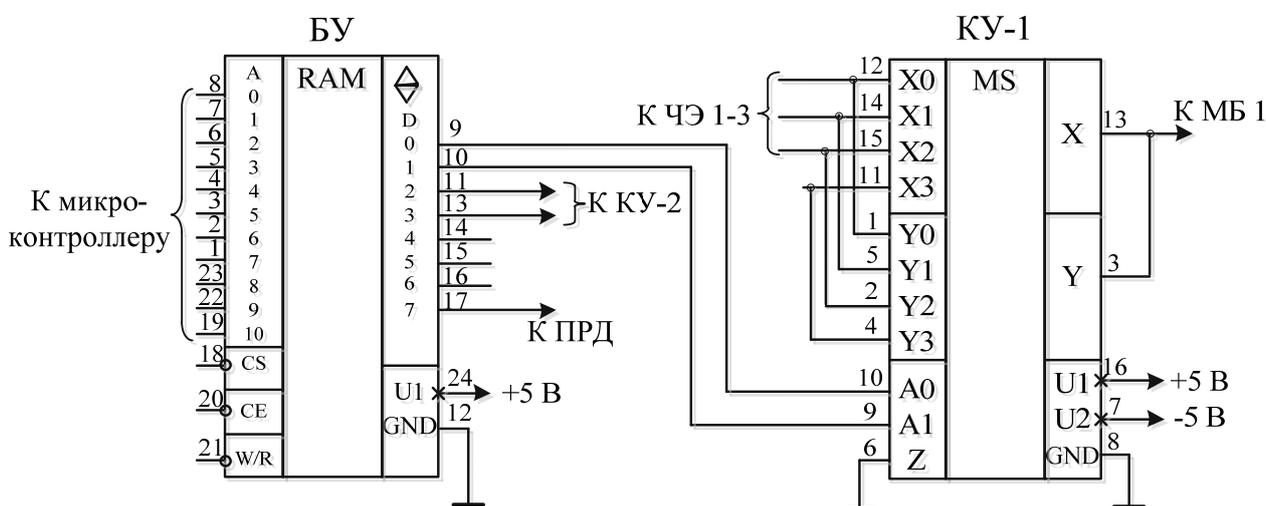


Рисунок 7 – Вариант применения микросхем K537PY8 и K561КП1 в составе многофункционального БДАП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом конкретных функциональных элементов (рис. 8) оптимальную по выбранному критерию (1) структуру многофункционального БДАП для заданных условий можно представить следующим образом (рис. 8).

Выигрыш по энергопотреблению и стоимости от применения разработанной схемы (рис. 8) по сравнению с исходной (рис. 1) при

$$K_{ИСХ} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 k_{ij} = 10,6,$$

для значений обобщенного показателя k_{ij} , заданных на рисунке 3, и

$$K_{РАЗР} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^9 k_{ij} = 4,5,$$

для существующих значений k_{ij} , заданных на рисунке 3, составляет

$$\eta = \frac{K_{ИСХ}}{K_{РАЗР}} = 2,35.$$

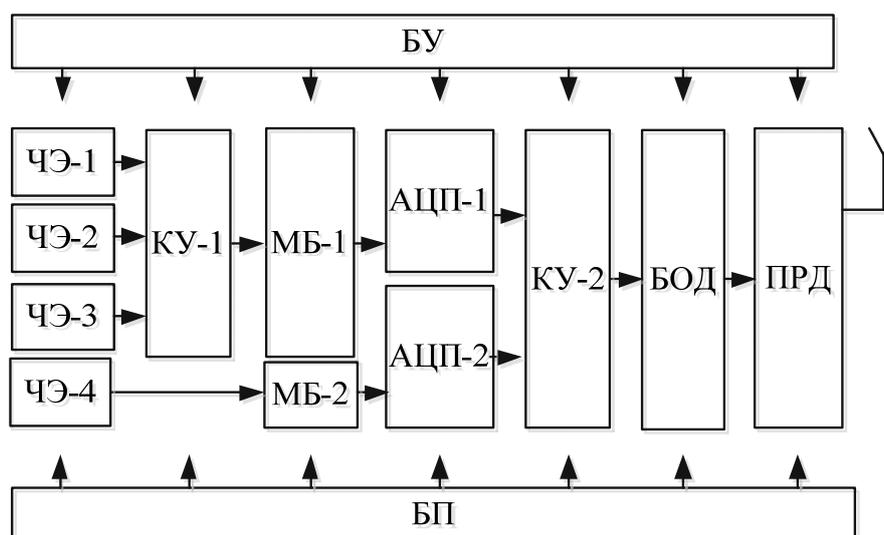


Рисунок 8 – Структурная схема многофункционального БДАИ

Полученное значение выигрыша может быть скорректировано с учетом реального энергопотребления микросхем K537PY8 и K561КП1, однако и в этом случае он очевиден.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Федерального дорожного агентства от 25 ноября 2009 г. № 493-р, «Об издании и применении ОДМ 218.28.003-2009 "Методические рекомендации по специализированному прогнозу состояния дорожного покрытия"».
2. Богданов, С.П. Перспективы и проблемы применения беспроводных датчиков с автономным питанием / С.П. Богданов, О.О. Басов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – №2(26), ч. 1. – С. 20-23.
3. Богданов, С.П. Управляемый режим работы автономных устройств резонансного контроля влажности материалов / С.П. Богданов, О.О. Басов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – №1(297). – С. 77-81.
4. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
5. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
6. Прянишников, В.А. Электроника. Курс лекций. Учебник для высших и средних учебных заведений / В.А. Прянишников. – М.: Корона-принт, 1998. – 416 с.
7. Шило, В.Л. Популярные цифровые микросхемы / В.Л. Шило. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
8. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды + SMD. Справочник А...Z. Том 1, А–R. - М.: Наука и техника, 2008. – 816 с.

Богданов Сергей Петрович

Академия Федеральной службы охраны России, г. Орел
 Преподаватель
 E-mail: spbogdanov@mail.ru

Басов Олег Олегович

Академия Федеральной службы охраны России, г. Орел
 Кандидат технических наук, докторант
 E-mail: oobasov@mail.ru

S.P. BOGDANOV, O.O. BASOV

OPTIMIZATION OF STRUCTURE OF MULTIFUNCTIONAL WIRELESS DEVICES WITH AUTONOMOUS POWER SUPPLY

The approach to the engineering of optimal structure of multifunctional wireless devices with autonomous power supply on the basis of algorithm for searching the shortest path on the composite

index that takes into account power consumption, cost and on the technical compatibility of the functional units is considered. A specific example is the gain in structural redundancy (35%) and the composite index (2.35) is demonstrated. Technical scheme of the basic functional units of the wireless devices is introduced.

Keywords: *wireless devices with autonomous power supply, power consumption, graph, Dijkstra algorithm.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rasporjazhenie Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 25 nojabrja 2009 g. № 493-r, «Ob izdanii i primenении ODM 218.28.003-2009 "Metodicheskie rekomendacii po specializirovannomu prognozu sostojanija dorozhnogo pokrytija"».
2. Bogdanov, S.P. Perspektivy i problemy primeneniya besprovodnyh datchikov s avtonomnym pitani-em / S.P. Bogdanov, O.O. Basov // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i ra-diojelektroniki. – 2012. – №2(26), ch. 1. – S. 20-23.
3. Bogdanov, S.P. Upravljaemyj rezhim raboty avtonomnyh ustrojstv rezonansnogo kontrolja vlazhno-sti materialov / S.P. Bogdanov, O.O. Basov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnolo-gii. – 2013. – №1(297). – S. 77-81.
4. Kristofides, N. Teorija grafov. Algoritmicheskij podhod / N. Kristofides. – M.: Mir, 1978. – 432 s.
5. Taha, Hemdi A. Vvedenie v issledovanie operacij. – M.: Vil'jamc, 2005. – 912 s.
6. Prjanishnikov, V.A. Jelektronika. Kurs lekcij. Uchebnik dlja vysshih i srednih uchebnyh zavedenij / V.A. Prjanishnikov. – M.: Korona-print, 1998. – 416 s.
7. Shilo, V.L. Populjarnye cifrovye mikroshemy / V.L. Shilo. – M.: Radio i svjaz', 1989. – 352 s.
8. Zarubezhnye mikroshemy, tranzistory, tiristory, diody + SMD. Spravochnik A...Z. Tom 1, A–R. - M.: Nauka i tehnika, 2008. – 816 s.

Bogdanov Sergey Petrovich

The Academy of the Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel
Teacher
E-mail: spbogdanov@mail.ru

Basov Oleg Olegovich

The Academy of the Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel
Candidate of Technical Sciences, doctoral candidate
E-mail: oobasov@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.112

Е.В. ПАХОЛКИН, И.О. КОБЗЕВ

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

Разработана методика проведения эксперимента по оценке параметра «расчетная максимальная температура» в зоне трения. В основу методики положен электрорезистивный метод трибодиагностики, позволяющий экспериментально определять временные параметры трения, влияющие на значение формирующейся в зоне трения температуры. В качестве объекта диагностирования рассматривается подшипник качения.

***Ключевые слова:** температура при трении, контактирование микронеровностей, электропараметрический метод диагностирования.*

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Распространенными элементами технических объектов являются различные трибосопряжения. Их надежность определяется большим числом факторов. Один из важнейших – это интенсивность протекания процессов термодеструкции в смазочных материалах. Особую важность рассматриваемый процесс имеет для трибосопряжений, которые относят к узлам трения с ресурсным режимом смазывания. Срок службы таких узлов напрямую зависит от срока службы смазочного материала. Для определения срока службы узлов трения с ресурсным режимом смазывания существуют специальные таблицы и диаграммы. Проблема заключается в отсутствии сведений о реально существующей рабочей температуре, действию которой подвергается смазочный материал. При этом известно, что даже в однотипных трибосопряжениях (например, в подшипниках качения одной партии) могут формироваться существенно различные условия фрикционного взаимодействия. Следствием являются различные значения фактического ресурса.

Прогнозирование ресурса трибосопряжений требует создания соответствующей методической и технической базы. Причем подходы к решению такой задачи могут быть различными и определяются областью применения методов и средств. В случае с разработкой научных основ мониторинга состояния подшипников качения большое количество потенциальных методов (например, методы химического анализа, аналитического контроля) становятся непригодными из-за ограниченных возможностей их применения.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [1, 2] описана математическая модель максимальной температуры в подшипнике качения. Рассмотрев в данной модели суммарную фактическую площадь контакта A_f , как произведение среднего диаметра фактического пятна контакта и количества этих контактов, предложено выражение, раскрывающее связь температуры в зоне трения с факторами и режимами, определяющими характер фрикционного взаимодействия:

$$T_{\max} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2,6 \cdot \tau_N \cdot F_r \cdot f_{\text{тр}} \cdot a_{\text{нк}}^{0,5}}{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\text{НИВ}}{\text{СЧМ}} \cdot Z \cdot \left[4 \cdot \lambda_{\text{нк}} \cdot a_{\text{нк}}^{0,5} + \lambda_{\text{нк}} \cdot (\pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot v_{\text{ск}})^{0,5} \right]} + \frac{\alpha_{\text{тп}} \cdot \Psi_V \cdot W_{\text{тп}} \cdot b_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{нк}} \cdot A_a \cdot \frac{\text{НИВ}}{\text{СЧМ}}} \cdot \left(0,3 \cdot (\tau_N + \tau_W) - \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \cdot \sum_{s=1}^s \frac{1}{s^2} \cdot \exp(-0,3 \cdot \pi^2 \cdot s^2) \right) + \frac{\alpha_{\text{тп}} \cdot W_{\text{тп}}}{m_{\text{об}} \cdot c_{\text{нк}}} \cdot \left(10 - 45 \cdot K \cdot \left(\frac{1 - \text{НИВ}}{\text{СЧМ}} \right) \right) + T_{\text{о.с.}} \quad (1)$$

где τ_N – временной фактор мощности трения;

F_r – радиальная нагрузка на подшипник;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения сталь-сталь без действия смазочного материала и в отсутствии оксидной пленки (значения коэффициента трения лежат в диапазоне 0,8..6,0);

$a_{\text{нк}}$ – коэффициент температуропроводности материала подшипника;

НИВ – нормированное интегральное время электрического контактирования (отношение суммарной длительности импульсов электрической проводимости, измеренной за время измерения, ко времени измерения);

СЧМ – средняя частота микроконтактирований (отношение количества импульсов электрической проводимости, измеренного за время измерения, ко времени измерения);

Z – число тел качения в подшипнике;

$\lambda_{\text{нк}}$ – коэффициент теплопроводности материала подшипника;

$d_{\text{ср}}$ – средний диаметр фактического пятна контакта;

$v_{\text{ск}}$ – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей;

$\alpha_{\text{тп}}$ – коэффициент разделения тепловых потоков;

Ψ_V – коэффициент учета поглощения тепловой энергии смазочным материалом;

$W_{\text{тп}}$ – работа, совершаемая силами трения за один цикл трения;

$b_{\text{эф}}$ – эффективная глубина передачи тепловой энергии;

A_a – контурная площадь контакта трущихся поверхностей деталей подшипника;

τ_W – временной фактор работы трения;

s – число членов ряда (выбирается исходя из соображений точности);

$m_{\text{нк}}$ – масса неподвижной обоймы подшипника;

$c_{\text{нк}}$ – коэффициент теплоемкости материала неподвижной обоймы подшипника;

K – коэффициент теплопоглощающей и теплоотдающей способности детали подшипника;

$T_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды (начальная температура подшипника).

Модель (1) получена на основе теории, представленной в работе [3], при этом временные параметры трения в данной модели предложено рассматривать как экспериментально определяемые диагностические параметры электрической группы.

При работе подшипника между телами качения и кольцами самопроизвольно образуется устойчивая пленка смазочного материала, разделяющего поверхности трения и препятствующая их металлическому контактированию. Толщина пленки непрерывно изменяется, возможны ее кратковременные локальные разрушения в контактах наиболее высоких микронеровностей поверхности (микроконтакты). Смазочный материал обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому изменение толщины смазочной пленки и микроконтактирования приводят к соответствующим флуктуациям электрического сопротивления зоны трения и подшипника в целом.

Численно параметр НИВ, определяется выражением

$$\hat{I}E\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (t_{\hat{e}i} - t_{i i})}{T_{\hat{e}}} \quad (2)$$

где n_0 – число импульсов активной электрической проводимости $g(t)$ объекта, превышающих по величине некоторое пороговое значение активной проводимости $g(t)_{\text{п0}}$, и зафиксированных за время $T_{\hat{e}}$;

$t_{i(\hat{e})i}$ – время начала (конца) i -го импульса активной электрической проводимости;

$T_{\hat{e}}$ – время измерения параметра.

Таким образом, НИВ характеризует, долю времени $T_{\hat{e}}$, в течение которого существовал контакт микронеровностей.

Параметр СЧМ численно определяется выражением

$$\tilde{N} \times \hat{I} = \frac{n_0}{T_{\hat{e}}}, \quad (3)$$

и характеризует число импульсов активной электрической проводимости за время измерения. Время одного импульса проводимости принимается за время одновременного существования пятен ювенильного контакта обоих колец с максимально нагруженным телом качения вследствие микропроскальзывания.

Зная долю времени трения за время измерения, а также количество импульсов контактирования, можно рассчитать среднее время единичного контактирования за время измерения параметров НИВ и СЧМ. Оно, в свою очередь, является оценкой времени t_0 трения единичного контакта микронеровностей. Среднее за время измерения значение этого времени можно определить по формуле

$$t_0 = \frac{\hat{I}E\hat{A}}{\tilde{N} \times \hat{I}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (t_{\hat{e}i} - t_{i i})}{n_0}. \quad (4)$$

Поскольку у неподвижного кольца в контакт вступают в основном одни и те же микронеровности, то время между окончанием одного импульса проводимости и до начала следующего импульса можно принять за время охлаждения этих микронеровностей. Средняя частота появления интервалов охлаждения за время измерения равна средней частоте импульсов проводимости, поскольку после каждого импульса следует интервал времени его отсутствия. Зная суммарную долю времени охлаждения, равную, а также среднюю за время измерения частоту появления интервалов охлаждения, можно определить среднее время охлаждения $t_{i0\hat{e}}$:

$$t_{i0\hat{e}} = \frac{1 - \hat{I}E\hat{A}}{\tilde{N} \times \hat{I}} = \frac{T_{\hat{e}} - \sum_{i=1}^{n_0} (t_{\hat{e}i} - t_{i i})}{n_0}. \quad (5)$$

Полученные выражения (4) и (5) позволяют перейти от предложенной в [3] теоретической модели к расчетно-экспериментальной, описываемой моделью (1).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика проведения эксперимента по оценке параметра «расчетная максимальная температура» в зоне трения включает следующие основные разделы: описание диагностических параметров электрической группы («нормированное интегральное время микроконтактирования», «средняя частота микроконтактирований») и сущности метода,

описание условий проведения эксперимента, описание технических средств, описание порядка проведения эксперимента, описание порядка обработки результатов эксперимента и формы представления результатов. Методика предполагает реализацию мер, направленных на повышение чувствительности (точности) определения избыточной температуры наружного кольца подшипника качения.

Все операции, связанные с измерением параметров НИВ и СЧМ, а также средней объемной температуры неподвижного кольца, необходимо проводить в лабораторных помещениях при нормальных климатических условиях.

Оборудование для измерений должно состоять из привода, устройств нагружения узла, электронных средств контроля и средств коммутации с объектом (токоъемные устройства). Привод должен обеспечивать вращение вала узла с заданной скоростью в соответствии с реализуемыми алгоритмами контроля. Устройство нагружения должно создавать радиальное нагружение заданной величины и характера (местное или циркуляционное) каждого из колец подшипника. Электронные средства контроля должны осуществлять измерение значений информативных параметров НИВ и СЧМ, их регистрацию (сбор и хранение данных), а также обеспечивать возможность измерения приращения температуры наружного кольца в различных точках. Средства коммутации должны обеспечивать надежный электрический контакт электронных средств контроля с элементами узла, электрически связанными с наружным и внутренним кольцами подшипника (корпусом и валом узла).

Проведение экспериментальных исследований выполнено с помощью стенда, представленного на рисунке 1 (стенд предоставлен ООО «НПП «Астрон Электроника, г. Орел»). Данная система включает в себя:

- средства коммутации;
- средства измерения диагностических параметров;
- персональный компьютер (ПК);
- бесконтактный измеритель температуры.



Рисунок 1 – Вид стенда

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были исследованы бывшие в эксплуатации подшипники качения типа 1000900, работающие при следующих условиях: частота вращения внутреннего кольца 500 об/мин, наружного – 0 об/мин; вид нагружения – местное радиальное; величина нагрузки 30 Н, тип закладываемого смазочного материала – жидкий (И-20А), количество – 0,3 мл.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Перед началом исследований, для стабилизации параметров работы каждого из подшипников, осуществля-

лась их работа в течение 300 с. По окончании этого времени одновременно производилась регистрация начального значения температуры наружного кольца подшипника ($\Theta_{нач}$), осуществлялся запуск регистрации количества тел качения, прошедших через поперечное сечение за время Q с периодом 2 с между измерениями; осуществлялся запуск регистрации средних за 10 с значений нормированного интегрального времени электрического контактирования (НИВ). По истечении 60 секунд с момента окончания прогона одновременно происходила остановка регистрации средних за 10 с значений параметра НИВ, осуществлялся запуск регистрации средних за 10 с значений средней частоты микроконтактирований (СЧМ). По истечении 120 секунд с момента начала исследований одновременно прекращалась регистрация значений параметра СЧМ, прекращалась регистрация количества тел качения, прошедших через поперечное сечение за единицу времени; производилась регистрация значения температуры кольца ($\Theta_1(t = 120 \text{ с})$). В последующие 120 секунд описанный цикл измерений повторялся. Таким образом, за 60 минут работы каждого из исследуемых подшипников был получен массив значений, представленный в таблице 1:

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования подшипников качения

Текущее время	Параметр Q	Параметр НИВ	Параметр СЧМ	Температура кольца
1 мин	$\{Q_{11}..Q_{160}\}$	$\{\text{НИВ}_{11}..\text{НИВ}_{16}\}$		$\Theta_{нач}(t=0 \text{ с})$
2 мин			$\{\text{СЧМ}_{11}..\text{СЧМ}_{16}\}$	$\Theta_1(t = 120 \text{ с})$
3 мин	$\{Q_{21}..Q_{260}\}$	$\{\text{НИВ}_{21}..\text{НИВ}_{26}\}$		
4 мин			$\{\text{СЧМ}_{21}..\text{СЧМ}_{26}\}$	$\Theta_2(t = 240 \text{ с})$
...		
...
59 мин	$\{Q_{301}..Q_{3060}\}$	$\{\text{НИВ}_{301}..\text{НИВ}_{306}\}$		
60 мин			$\{\text{СЧМ}_{301}..\text{СЧМ}_{306}\}$	$\Theta_{30}(t=3600 \text{ с})$

Обработка результатов заключалась в определении: средних для каждого из $i=30$ временных интервалов длительностью в 120 с значений параметра Q ($Q_{срi}$ при $i=30$); средних для каждого из $i=30$ временных интервалов длительностью в 60 с значений параметра НИВ ($\text{НИВ}_{срi}$ при $i=30$); средних для каждого из $i=30$ временных интервалов длительностью в 60 с значений параметра СЧМ ($\text{СЧМ}_{срi}$ при $i=30$) в соответствии с выражениями:

$$Q_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^{60} Q_{i j}}{60}, \tag{6}$$

$$\text{НИВ}_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^6 \text{НИВ}_{i j}}{6}, \tag{7}$$

$$\text{СЧМ}_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^6 \text{СЧМ}_{i j}}{6}. \tag{8}$$

Таким образом каждому усредненному за 120 с значению $Q_{срi}$, соответствовало два усредненных за 60 с значения $НИВ_{срi}$, $СЧМ_{срi}$. Исходя из значений $Q_{срi}$ была определена средняя скорость проскальзывания поверхностей тел качения по рабочей поверхности наружного кольца ($v_{ски}$) для каждого из интервалов времени длительностью в 120 с.

Для каждой пары значений $НИВ_{срi}$ и $СЧМ_{срi}$ было оценено среднее время контакта (рассматриваемое как средний период трения) (t_{Ti}), и среднее время его отсутствия (рассматриваемое как средний период охлаждения) ($t_{охлi}$) согласно выражениям:

$$t_{Ti} = \frac{НИВ_{срi}}{СЧМ_{срi}}, \tag{9}$$

$$t_{охлi} = \frac{1 - НИВ_{срi}}{СЧМ_{срi}}. \tag{10}$$

Полученные пары значений t_{Ti} и $t_{охлi}$ рассматривались как средний период трения и средний период охлаждения для соответствующего интервала времени длительностью в 120 с.

Для каждого i -го временного интервала длительностью в 120 с согласно выражению (6) была определена величина средней линейной протяженности контакта $L_{r i}$:

$$L_{r i} = t_{Ti} \cdot v_{ски}. \tag{11}$$

Приращение температуры наружного кольца $\Delta\Theta_{нкi}$ для каждого i -го интервала времени определялось согласно выражению:

$$\Delta\Theta_{нкi} = \Theta_i - \Theta_{i-1}, \tag{12}$$

где Θ_i – значение температуры наружного кольца по окончании i -го интервала времени длительностью в 120 с.

Таким образом, после обработки массив параметров, характеризующий каждый из исследованных подшипников, имеет вид, представленный в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования подшипников качения после обработки

Текущее время	Параметр НИВ	Параметр СЧМ	Параметр L_r	Приращение температуры кольца
2 мин	$НИВ_{ср1}$	$СЧМ_{ср1}$	L_{r1}	$\Delta\Theta_{нк1}$
4 мин	$НИВ_{ср2}$	$СЧМ_{ср2}$	L_{r2}	$\Delta\Theta_{нк2}$
...
60 мин	$НИВ_{ср30}$	$СЧМ_{ср30}$	L_{r30}	$\Delta\Theta_{нк30}$

Для сравнительной оценки значений чувствительности максимальной температуры к параметрам НИВ, СЧМ и L_r с помощью теоретической зависимости были построены графики зависимости чувствительности максимальной температуры в подшипнике качения к данным параметрам. При построении данных зависимостей принималось, что контакт микронеровностей реализуется без образования пленок между металлическими поверхностями. Графики зависимости чувствительности максимальной температуры к каждому из параметров НИВ, СЧМ при различных значениях параметра L_r , представлены на рисунках 2 и 3 (на рисунках для наглядности представлены значения скорости проскальзывания, косвенно определяющей параметр L_r).

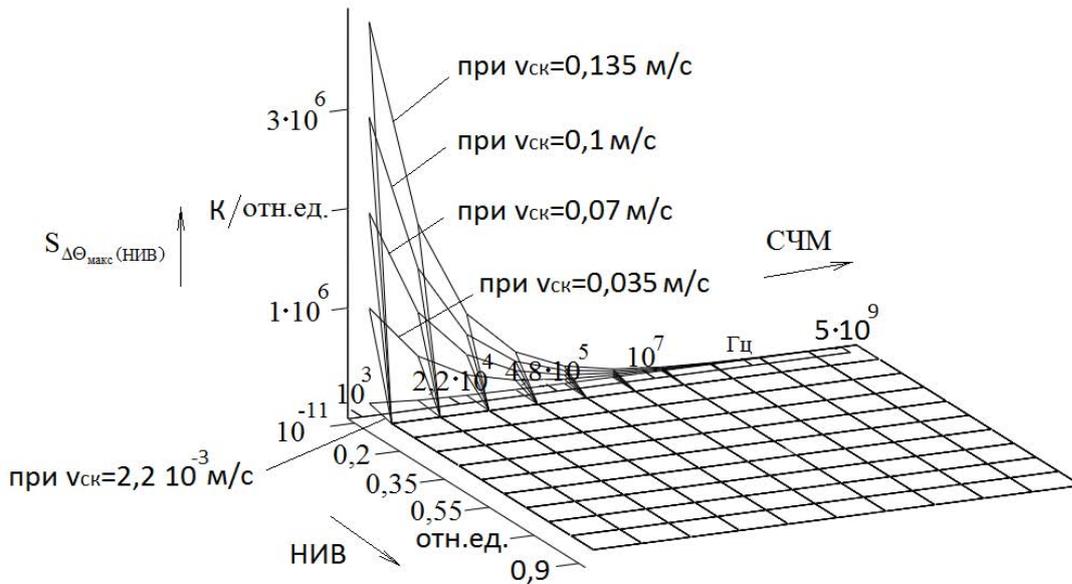


Рисунок 2 – Зависимость чувствительности максимальной температуры в подшипнике качения к параметру НИВ при различных значениях скорости проскальзывания

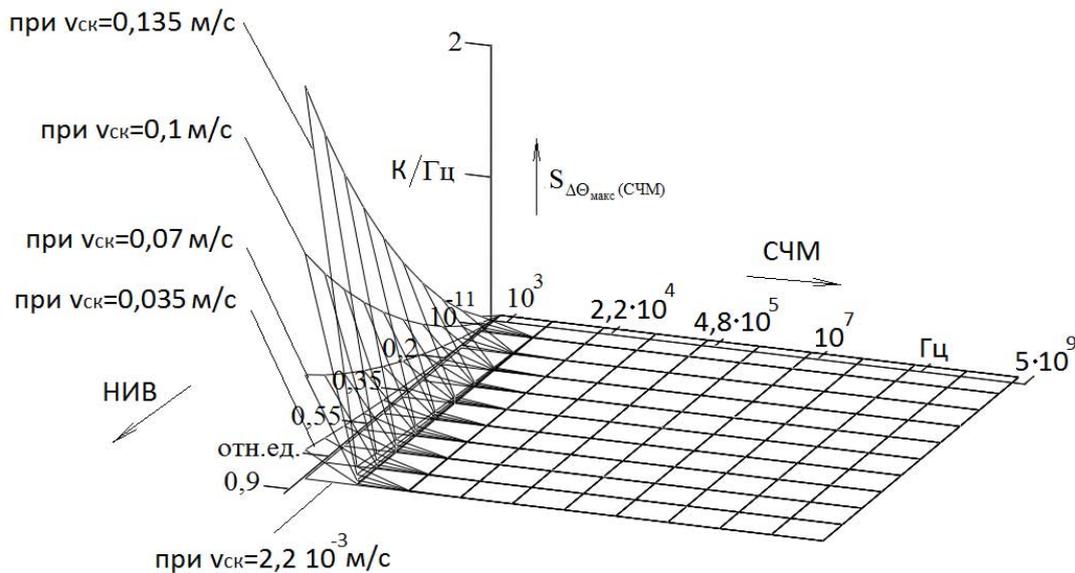


Рисунок 3 – Зависимость чувствительности максимальной температуры в подшипнике качения к параметру СЧМ при различных значениях скорости проскальзывания

Изображенные на рисунках графические зависимости подтверждают значительно большую чувствительность максимальной температуры к параметру НИВ, чем к СЧМ. При этом результаты экспериментальных исследований в целом подтверждают характер зависимости максимальной температуры от предложенных диагностических параметров [1, 2].

Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант 12-08-97579-р_центр_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. – № 6 – С. 143-150.
2. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы [Текст] / Е.В. Пахолкин, И.О. Кобзев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. – № 6.2 – С. 34-40.

3. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с., ил.

Пахолкин Евгений Васильевич

Госунiversитет - УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, профессор
Тел. 89208112686
E-mail: eugene_p@bk.ru

Кобзев Илья Олегович

Госунiversитет - УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. 89208085387
E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

E.V. PAKHOLKIN, I.O. KOBZEV

**EXPERIMENTAL METHODS AND TECHNIQUES TEMPERATURE
FRICTION STUDY OF INTERACTION BY ELECTRIC METHOD**

The technique of the experiment to evaluate the parameter "estimated maximum temperature" in the area of friction. The methodology laid tribodiagnostics electric resistance method to experimentally determine the timing of friction affecting the value emerging in the friction zone temperature. As the object of diagnosis is considered bearings.

Keywords: *friction temperature, contactihg of microroughnesses, electroparametrical method of diagnosing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temeperatury v sharikopodshipnike. Chast' 1. Matematicheskaja model' maksimal'noj temperatury [Tekst] / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6 – S. 143-150.
2. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temperatury v sharikopodshipnike. Chast' 2. Primenenie diagnosticheskikh parametrov jelektricheskoy gruppy [Tekst] / E.V. Paholkin, I.O. Kobzev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6.2 – S. 34-40.
3. Chichinadze, A.V. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka): uchebnik dlja tehniceskikh vuzov [Tekst] / A.V. Chichinadze, Je.D. Braun, N.A. Bushe i dr. – М.: Mashinostroenie, 2001. – 664 s., il.

Pakholkin Evgeniy Vasilyevich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor, professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 41-98-76
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Kobzev Iliya Olegovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. 89208085387
E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

А.М. СОЛОВЬЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО КОНТРОЛЯ УСИЛИТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На основе разработанной математической модели усилителя переменного тока получены зависимости коэффициента усиления от параметров прибора контроля, которые могут быть учтены для повышения достоверности контроля радиоэлектронной аппаратуры с использованием автоматизированных систем.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, контроль, усилитель.

Производство и эксплуатация радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в настоящее время невозможны без своевременного контроля ее состояния – одной из функций процесса управления, заключающегося в оценке величины контролируемого параметра и его отклонений от требуемого значения. Операции технологического контроля выполняются при настройке (наладке) аппаратуры и при ее периодическом тестировании в процессе эксплуатации [1].

Целью контроля РЭА при наладке является определение соответствия фактических значений параметров и показателей качества изготовленных изделий установленным требованиям (техническим условиям и другой нормативно-технической документации).

На стадии эксплуатации характер контроля несколько видоизменяется, поскольку качество и надежность РЭА зависят от условий реальной среды, в том числе от взаимодействия с человеком [2]. В таких условиях происходит изменение параметров РЭА, что, в свою очередь, определяет особенности применения измерительных приборов при различных видах контроля на этапах жизненного цикла изделия.

Контроль при наладке РЭА выполняется в процессе ее производства, настройки и регулировки. При производстве РЭА существом контроля является определение готовности радиоэлементов к работе в конкретном устройстве. При этом контролируется как работоспособность элементов РЭА, так и качество монтажной схемы и сборки РЭА [2].

Контроль при настройке – это подбор или задание режимов функционирования РЭА. Функция контроля заключается в соблюдении требуемых режимов работы РЭА, заданных соответствующими нормативами на изделие [1]. При этом выполняется тестирование режимов работы полупроводниковых приборов, отдельных каскадов усилителей и всего устройства для выполнения заданной целевой функции.

Контролем при регулировке достигаются требуемые значения параметров, характеризующих работу РЭА, для обеспечения требований технических условий посредством компенсации отклонений контролируемых параметров РЭА с учетом заданных значений.

Контроль при тестировании – это проверка функционирования РЭА и ее составных частей с помощью "тестовой программы", например, генератора специальных сигналов, программного обеспечения и других средств, имитирующих условия эксплуатации. При тестировании на РЭА подаются специальные тестовые воздействия от средств контроля, и по результатам сравнения выходных сигналов с пороговыми значениями принимается решение о выполнении объектом контроля части или всех свойственных ему функций. Тестовый контроль обеспечивает проверку РЭА в работоспособном состоянии на момент контроля [1].

При контроле средства измерения и приспособления становятся неотъемлемой частью функционирующей радиоэлектронной аппаратуры, и их взаимное влияние может привести к некоторому изменению свойств РЭА и показаний измерительных схем.

В частности, входное сопротивление подключаемого средства измерения может влиять на режим работы РЭА и привести к недопустимой погрешности результатов измерений. При контроле в цепях переменного тока следует учитывать активную и реактивную составляющие входного сопротивления средства измерения, причем на работу высокочастотной РЭА особенно сильно воздействуют емкостные составляющие входных сопротивлений

приборов. Подключение вольтметра или осциллографа к колебательному контуру приводит к уменьшению его резонансной частоты за счет входной емкости и снижению добротности контура из-за шунтирующего действия активного входного сопротивления этих приборов [3].

Известные математические модели, учитывающие разные режимы работы усилителей, не являются полностью адекватными, так как отражают процесс проверки при выводе усилителя из рабочего режима без учета влияния параметров подключенного прибора контроля.

Это делает актуальным создание комплексной математической модели, учитывающей наличие прибора контроля в структуре усилителя, позволяющей минимизировать его влияние на результаты измерений и повысить достоверность контроля качества усилителей.

В частности, периодическое измерение напряжений на нагрузке U_H и на входе $U_{ВХ}$ усилителя с использованием известной математической модели коэффициента усиления [4]

$$K_U = U_H / U_{ВХ} \quad (1)$$

позволяет по изменению его значений прогнозировать выход за пределы рабочей апертуры и выявлять изменения в структуре усилителя, которые могут повлиять на его функционирование.

Математическая модель усилителя с учетом параметров транзисторов составляется в три этапа: по принципиальной схеме сначала составляют эквивалентную схему усилителя, затем выполняют расчет входных и выходных сопротивлений, и на последнем этапе определяют коэффициенты усиления отдельных каскадов и усилителя в целом [5].

1 этап. Принципиальная схема исследуемого усилителя переменного тока (рис. 1, а) содержит четыре усилительных каскада с непосредственной связью между ними, имеет трансформаторную связь с нагрузкой и охвачена цепью отрицательной обратной связи через сопротивление R_{10} для обеспечения требуемого коэффициента усиления K_U .

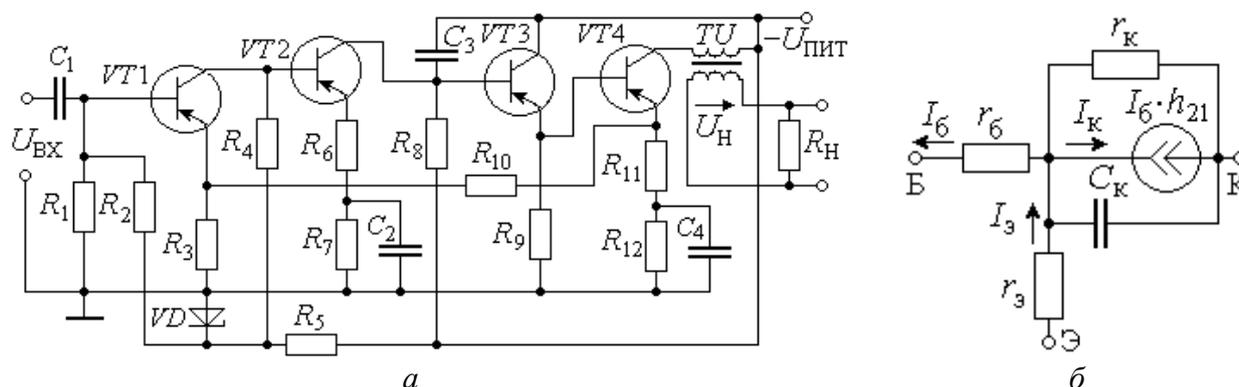


Рисунок 1 – Схема исследуемого усилителя переменного тока
а – принципиальная схема усилителя; б – эквивалентная схема транзистора

При расчетах усилителей каждый транзистор заменяют эквивалентной схемой, содержащей сопротивление базы r_6 , дифференциальные сопротивления коллектора r_k и эмиттера r_3 и источник тока коллектора $I_k = h_{21}I_6$ (рис. 1, б). Для упрощения формул принимают типовые допущения: пренебрегают объемным сопротивлением базы ($r_6 \rightarrow 0$) и сопротивлением коллектора ($r_k \rightarrow \infty$), принимают коэффициент усиления тока базы $h_{21} \gg 1$ и вычисляют сопротивление эмиттера $r_3 \approx \varphi_T / I_3$ по температурному потенциалу $\varphi_T \approx 25$ мВ и току эмиттера I_3 [4].

2 этап. При расчетах многокаскадных усилителей проще использовать структурное представление усилителя в виде последовательно соединенных "черных ящиков" (рис. 2), что позволяет избежать ошибок и в целом наглядно представить весь процесс расчета.

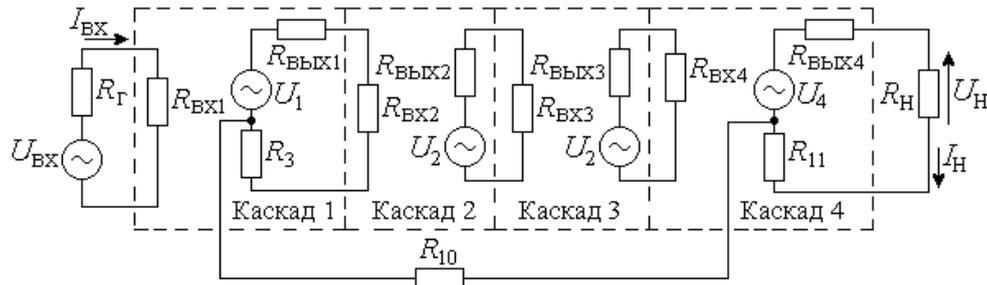


Рисунок 2 – Структурная схема усилителя переменного тока

В такой структуре входное сопротивление $R_{ВХ}$ последующего $(n + 1)$ каскада является сопротивлением нагрузки $R_{Н}$ предыдущего n -го каскада, а выходное сопротивление n -го каскада является сопротивлением источника сигнала $R_{Г}$ для последующего $(n + 1)$ каскада:

$$R_{ВХ(n+1)} = R_{Н(n)} ; R_{ВЫХ(n)} = R_{Г(n+1)} . \quad (2)$$

Применительно к условиям эксплуатации необходимо знать значения входного сопротивления первого каскада усилителя и выходного сопротивления его последнего каскада.

Для расчета входного сопротивления первого каскада на транзисторе с общим эмиттером (рис. 1) следует учесть и сопротивление делителя $R_{д} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$:

$$R_{ВХ.1} = \frac{R_1 R_2 \cdot (1 + h_{21}) \cdot (R_3 + r_{э1})}{(1 + h_{21}) \cdot (R_3 + r_{э1}) + R_1 + R_2} . \quad (3)$$

Выходное сопротивление последнего каскада усилителя $R_{ВЫХ}$ устанавливают с учетом коэффициента трансформации $n_T < 1$ выходного трансформатора, служащего для согласования с сопротивлением нагрузки усилителя, составляющим в данном случае $R_{Н} = 600 \text{ Ом}$:

$$R_{ВЫХ.4} = R_{Н} / n_T^2 . \quad (4)$$

3 этап. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя определяется произведением коэффициентов усиления последовательно включенных каскадов по выражению:

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot K_{U3} \cdot K_{U4} / (1 + \gamma K) , \quad (5)$$

где $(1 + \gamma K)$ – глубина общей отрицательной обратной связи усилителя.

Коэффициенты усиления отдельных каскадов можно определить без учета влияния обратной связи (при $R_{10} \gg R_{11}$), начиная от последнего каскада к первому, по формулам:

$$K_{U4} = R_{Н} / n_T^2 (R_{11} + r_{э4}) ; \quad (6)$$

$$K_{U3} = \frac{R_9 \cdot h_{21} (R_{11} + r_{э4})}{r_{э4} \cdot [R_9 + h_{21} (R_{11} + r_{э4})] + R_9 \cdot h_{21} (R_{11} + r_{э4})} = \frac{R_9 \cdot R_{ВХ.4}}{r_{э4} \cdot (R_9 + R_{ВХ.4}) + R_9 \cdot R_{ВХ.4}} \approx 1 ; \quad (7)$$

$$K_{U2} = \frac{R_8 \cdot R_{ВХ.3}}{(R_8 + R_{ВХ.3}) \cdot (r_{э2} + R_6)} = \frac{R_8 \cdot h_{21} \cdot [r_{э3} \cdot (R_9 + R_{ВХ.4}) + R_9 \cdot R_{ВХ.4}]}{(R_9 + R_{ВХ.4}) \cdot (r_{э2} + R_6)} ; \quad (8)$$

$$K_{U1} = \frac{R_4 \cdot R_{ВХ.2}}{(R_4 + R_{ВХ.2}) \cdot (r_{э1} + R_3)} = \frac{R_4 \cdot h_{21} (r_{э2} + R_6)}{[R_4 + h_{21} (r_{э2} + R_6)] \cdot (r_{э1} + R_3)} . \quad (9)$$

Общий коэффициент усиления с учетом обратной связи определяется выражением

$$K_U = \frac{K_{U1} K_{U2} K_{U3} K_{U4}}{1 + r_{э1} R_3 / (r_{э1} R_3 + r_{э1} R_{10} + R_3 R_{10})} . \quad (10)$$

Согласно выражению (10), на коэффициент усиления влияет дифференциальное сопротивление эмиттера $r_{э1}$ транзистора VT1, которое зависит от температурного потенциала ϕ_T и изменяется примерно на 3 % при изменении температуры эксплуатации на $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ [4].

Для повышения стабильности коэффициента усиления в диапазоне рабочей температуры нужно изменить структуру усилителя, т. е. разделить на две части сопротивление R_3 в первом каскаде и уменьшить вдвое сопротивление R_{10} в цепи обратной связи (рис. 3).

При такой сравнительно небольшой модернизации схемы коэффициент усиления определяется выражением

$$K_U = \frac{K_{U1}K_{U2}K_{U3}K_{U4}}{1 + R_3(r_{31} + 0,5R_3)/(r_{31}R_3 + r_{31}R_{10} + R_3R_{10} + 0,5R_3 \cdot R_3)} \quad (11)$$

Согласно формуле (11), температурная стабильность коэффициента усиления повышается в $(1 + 0,5R_3/r_{31})$ раз по сравнению

с исходной схемой усилителя (рис. 1). Таким образом, применение математической модели позволяет обеспечить улучшение основных параметров усилителя посредством изменения его структуры.

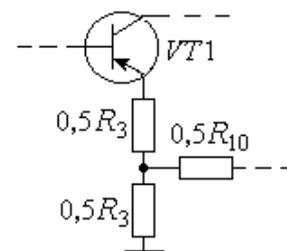


Рисунок 3 – Изменение схемы первого каскада

Математическая модель усилителя при подключении прибора контроля позволяет определить степень влияния параметров прибора контроля на коэффициент усиления K_U .

Для оценки такого влияния представим эквивалентную схему входных цепей прибора контроля, подключенного к входу усилителя, составляющими $R_{пр.1}$, $C_{пр.1}$, и составляющими $R_{пр.2}$, $C_{пр.2}$ для цепей прибора, подключенного к выходу усилителя (рис. 4).

Наличие входных сопротивлений измерительного прибора приводит к изменению коэффициента усиления напряжения из-за изменения входного сопротивления усилителя до сопротивления Z_1 , определяемого параллельным подключением входных сопротивлений прибора контроля $Z_{пр.1}$ и исследуемого усилителя $R_{вх.1}$:



Рисунок 4 – Эквивалентные схемы цепей прибора контроля для измерения коэффициента усиления

$$Z_1 = \frac{R_{вх.1} \cdot Z_{пр.1}}{R_{вх.1} + Z_{пр.1}} = \frac{R_{вх.1} \cdot R_{пр.1} / \sqrt{1 + \omega^2 \cdot R_{пр.1}^2 \cdot C_{пр.1}^2}}{R_{вх.1} + R_{пр.1} / \sqrt{1 + \omega^2 \cdot R_{пр.1}^2 \cdot C_{пр.1}^2}}, \quad (12)$$

а также от изменения сопротивления нагрузки до сопротивления Z_2 , определяемого параллельным подключением сопротивления R_H и сопротивления прибора контроля $Z_{пр.2}$:

$$Z_2 = \frac{R_H \cdot Z_{пр.2}}{R_H + Z_{пр.2}} = \frac{R_H \cdot R_{пр.2} / \sqrt{1 + \omega^2 \cdot R_{пр.2}^2 \cdot C_{пр.2}^2}}{R_H + R_{пр.2} / \sqrt{1 + \omega^2 \cdot R_{пр.2}^2 \cdot C_{пр.2}^2}}. \quad (13)$$

Вследствие влияния входных цепей прибора контроля коэффициент усиления исследуемого усилителя уменьшается до значения, определяемого выражением:

$$K_{U.пр} = \frac{K_{U1}K_{U2}K_{U3}K_{U4}}{1 + R_3(r_{31} + 0,5R_3)/(r_{31}R_3 + r_{31}R_{10} + R_3R_{10} + 0,5R_3 \cdot R_3)} \times \frac{Z_{пр.1}}{R_{вх.1} + Z_{пр.1}} \times \frac{Z_{пр.2}}{R_H + Z_{пр.2}}. \quad (14)$$

Согласно (14), на результаты измерения коэффициента усиления влияют отношения сопротивлений приборов к входному сопротивлению усилителя и к сопротивлению нагрузки, учет которых позволяет значительно повысить точность оценки качества усилителя.

Математическая модель усилителя при структурном контроле позволяет определять и прогнозировать изменения в его функционировании путем измерения параметров

элементов (реальная целевая функция) и сравнением с начальным состоянием по критерию

$$K(f, \varphi, \varepsilon) = \max |f - \varphi| \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где f – заданная целевая функция; φ – реальная целевая функция; ε – значение установленных критериев (требований или норм) для оценки качества функционирования усилителя.

В качестве целевой функции f можно использовать математическую модель (14), а в качестве реальной целевой функции φ – измеренный коэффициент усиления напряжения. За критерий качества усилителя ε можно принять допустимое отклонение коэффициента усиления на $\pm 3\%$ от номинального значения, составляющего в данном случае $K_{U, \text{ном}} = 90$ [6].

Результаты структурного моделирования усилителя получены в среде *MathCAD* при исследовании влияния измерительных приборов на коэффициент усиления напряжения и представлены в виде графических зависимостей (рис. 5), по которым можно судить о влиянии измерительных цепей приборов на результаты измерений контролируемых параметров и дать практические рекомендации по уменьшению и предупреждению такого влияния.

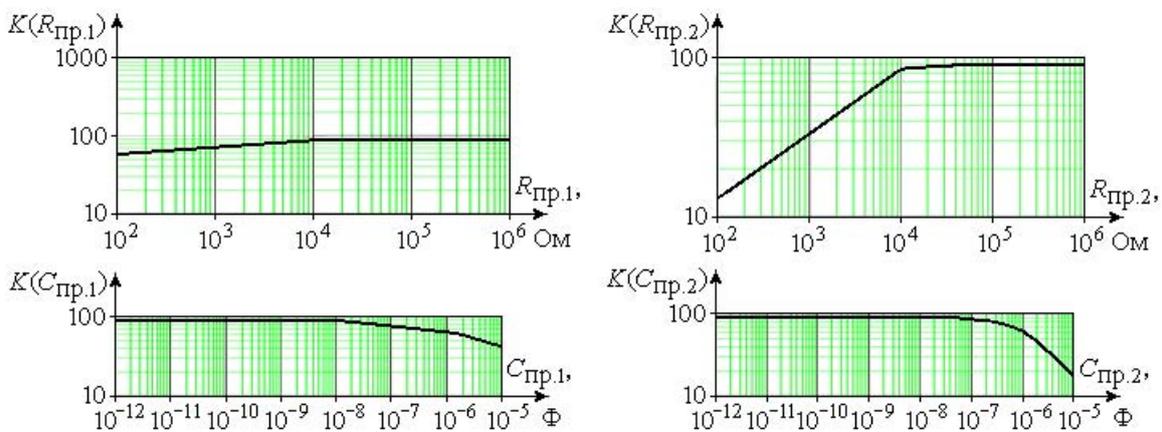


Рисунок 5 – Графики зависимости коэффициента усиления по напряжению от входных сопротивлений и емкостей приборов контроля

По графикам (рис. 5) можно оценить влияние активной и реактивной составляющих входного сопротивления прибора контроля на коэффициент усиления и учесть их влияние на результаты измерений. Таким образом, предложенную математическую модель усилителя с прибором контроля (14) можно использовать в качестве базовой модели при проведении структурного контроля его качества. Полученные результаты моделирования могут быть также применены для повышения точности измерений различных параметров усилителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Ю.П. Контроль измерительно-вычислительных комплексов / Ю.П. Иванов. – СПб.: Энергия, 2004. – 98 с.
2. Малинский, В.Д. Испытания радиоаппаратуры / В.Д. Малинский. – Л.: Издательство "Энергия", 1998. – 440 с.
3. Богданов, Г.П. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г.П. Богданов, В.А. Кузнецов и др. / Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
4. Волков, М.А. Основы схемотехники / М.А. Волков, А.Д. Ефремов. – Орел: Академия ФСО России, 2012. – 187 с.
5. Петров, М.Н. Моделирование компонентов и интегральных схем / М.Н. Петров. – СПб.: Лань, 2011. – 464 с.
6. ГОСТ 23849-93. Методы измерения электрических параметров усилителей звуковой частоты.

Соловьёв Александр Михайлович
 Академия ФСО России, г. Орел
 Преподаватель кафедры
 E-mail: solowjevam@mail.ru

A.M. SOLOWJEV

MODELING OF STRUCTURAL CONTROL FOR THE ALTERNATING CURRENT AMPLIFIER

Based on the developed mathematical model for the alternate current amplifier dependences of gain amount from parameters of the device of control which can be considered for increase of reliability of control of radio-electronic equipment with use of automated systems are received.

Keywords: *mathematical model, modeling, control, amplifier.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ivanov, Ju.P. Kontrol' izmeritel'no-vychislitel'nyh kompleksov / Ju.P. Ivanov. – SPb.: Jenergija, 2004. – 98 c.
2. Malinskij, V.D. Ispytanija radioapparatury / V.D. Malinskij. – L.: Izdatel'stvo "Jenergija", 1998. – 440 s.
3. Bogdanov, G.P. Metrologicheskoe obespechenie i jekspluatacija izmeritel'noj tehniki / G.P. Bogdanov, V.A. Kuznecov i dr. / Pod red. V.A. Kuznecova. – M.: Radio i svjaz', 1990. – 240 s.
4. Volkov, M.A. Osnovy shemotehniki / M.A. Volkov, A.D. Efremov. – Orel: Akademija FSO Rossii, 2012. – 187 s.
5. Petrov, M.N. Modelirovanie komponentov i integral'nyh shem / M.N. Petrov. – SPb.: Lan', 2011. – 464 s.
6. GOST 23849-93. Metody izmerenija jelektricheskikh parametrov usilitelej zvukovoj chastoty.

Solowjev Alexandr Mihaylovich

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Lector

E-mail: solowjevam@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unprk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.
Тираж 600 экз.
Заказ № 67/13П2

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.