



Научно – технический журнал
Издается с 1995 года

Выходит шесть раз в год

№ 1 (309) 2015

Январь – февраль

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,
председатель
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф.,
зам. председателя
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.
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:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Зубянинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Клименко С.А. д-р техн. наук, проф. (Украина)
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН (Россия)
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Машинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Мирсалмнов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.
(Азербайджан)
Мудюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., (Россия)
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.
(Беларусь)
Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,
41-98-03, +7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

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

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

© Госуниверситет – УНПК, 2015

Содержание

Естественные науки

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Аскаров В.А.</i> Обратная периодическая задача механики разрушения для составного тела при изгибе..... | 3 |
| <i>Калантарлы Н.М.</i> Напряженно-деформированное состояние кольцевого диска, ослабленного системой трещин со связями между берегами в концевых зонах..... | 10 |
| <i>Мосин Ю.В., Преснецова В.Ю., Ромашин С.Н., Сами Аль Шатеби.</i> Связь модулей упругости твердого раствора с концентрацией компонент..... | 17 |
| <i>Фоминова О.В., Барбашова Т.А., Чернышев В.И.</i> Определение параметров установившихся колебаний виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем методом гармонического баланса..... | 23 |

Моделирование технологических процессов

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Канатников Н.В., Харламов Г.А., Черепенько А.А., Татарченков Н.В.</i> Возможности управления процессами обработки периодических поверхностей деталей машин на этапе технологической подготовки производства..... | 30 |
| <i>Михрютин В.В.</i> Разработка модели геометрического образа шероховатой поверхности при точении деталей с криволинейной образующей..... | 34 |
| <i>Ирзаев Г.Х.</i> Модель прогнозирования конструкторско-технологических изменений в изделии на этапах освоения и серийного производства..... | 43 |

Конструирование, расчеты, материалы

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Пассар А.В., Тимошенко Д.В.</i> Проектирование проточной части радиально-осевой турбины с использованием метода множителей Лагранжа..... | 54 |
| <i>Иванов А.М., Лукин Е.С.</i> Прочность и малоцикловая усталость конструкционных сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации..... | 62 |
| <i>Зибров Г.В., Старов В.Н., Смоленцев Е.В., Попов А.В.</i> Структура и выбор физических воздействий для управления прочностными характеристиками ответственных конструкций..... | 68 |
| <i>Воробьев В.И., Измеров О.В., Борзенков М.И., Авдаченко В.С., Корчагин В.О.</i> Особенности синтеза механической части энергосберегающего тягового привода локомотива..... | 73 |
| <i>Самотканов А.В.</i> Снижение мощности потерь электропривода вентилятора охлаждения на тяговом подвижном составе..... | 81 |

Машиностроительные технологии и инструменты

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Бобровский И.Н., Мельников П.А., Лукьянов А.А., Ежелев А.В.</i> К задачам фундаментального исследования технологий повышения энергоэффективности работы узлов машин..... | 86 |
| <i>Коноплев А.Н., Кропотов Ю.А.</i> Система автоматизированного составления оперативного календарного плана для мелкосерийного производства..... | 91 |

Приборостроение и биотехнические системы

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Белых П.М., Новикова И.Н., Дунаев А.В., Шураева Е.В.</i> Контроль эффективности применения ортопедического средства по анализу изменений параметров микроциркуляторно-тканевых систем биотканей..... | 99 |
| <i>Иванов Ю.Б., Иванов Б.Р.</i> Фотодатчики контроля импульсного излучения с компенсацией внешней засветки..... | 108 |

Контроль, диагностика, испытания

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Плахотникова Е.В., Протасьев В.Б.</i> Закон совместимости как базовый элемент повышения качества систем «электропривод - запорная арматура» на пути к импортозамещению..... | 113 |
| <i>Арискин Е.О., Кузнецов О.И., Никитин А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.</i> Система измерения параметров вектора ветра на вертолете на основе ионно-меточных и аэрометрических измерительных каналов..... | 122 |
| <i>Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Моисеев В.А.</i> Технично-экономическое обоснование выполнения контрольно-диагностических операций..... | 133 |
| <i>Михайлова О.С., Булаева Н.М., Мусихина Е.А.</i> Разработка модели региональной автоматизированной экспертной системы..... | 140 |
| <i>Рябцев М.В.</i> Алгоритм самодиагностики и коррекции режима работы пилотажно-навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата..... | 148 |
| <i>Лебедев М.А., Кизимов А.Т., Тарамадзе Р.Ч.</i> Алгоритмы оценивания нелинейных стохастических процессов в навигационной системе легкого беспилотного летательного аппарата..... | 153 |

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней.



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

№ 1 (309) 2015

January – february

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-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.
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., hon-
ored worker of science of Russian Federation

Editor-in-chief Assistants

Barsiikov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Buchach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Russia)
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Klimenko S.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS (Russia)
Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Russia)
Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Azerbaijan)
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Belarus)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,
41-98-03, +7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

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

Index on the catalogue of the «Pressa Rossiya»
29504

© State University ESPC, 2015

Contents

Natural sciences

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Askarov V.A.</i> Periodic inverse problem of fracture mechanics for composite body at bending | 3 |
| <i>Kalantarly N.M.</i> Stress–strain state of an annular disk, weakened by system of cracks with bonds between the faces in the end zones | 10 |
| <i>Mosin Yu.V., Presnetcova V.Yu., Romashin S.N., Sami Al Shatebi.</i> Communication of the elastic modules of the solid solution with a concentration of component | 17 |
| <i>Fominova O.V., Barbashova T.A., Chernishev V.I.</i> Determination of the parameters of the steady–state oscillation vibration–shielding system with the controlled dynamic extinguisher by the method of harmonic balance | 23 |

Modelling of technological processes

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Kanatnikov N.V., Harlamov G.A., Cherepenko A.A., Tatarchenkov N.V.</i> Ability for control the processing of periodic machine details surfaces during technological preparation of production | 30 |
| <i>Mihryutin V.V.</i> Development models geometric images rough surface turning parts with a curvilinear generatrix | 34 |
| <i>Irzaev G.Kh.</i> Model to predict changes in the design and manufacturing technology products at the stages of mastering and series production | 43 |

Designing, calculations, materials

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Passar A.V., Tymoshenko D.V.</i> Design flow of francis turbine using the method of Lagrange multipliers | 54 |
| <i>Ivanov A.M., Lukin E.S.</i> Strength and low–cycle fatigue of structural steels subjected to severe plastic deformation | 62 |
| <i>Zibrov G.V., Starov V.N., Smolentsev E.V., Popov A.V.</i> Structure and selection physical impact management strength characteristics critical structures | 68 |
| <i>Vorobiev V.I., Imerov O.V., Borzenkov M.I., Avdazenko V.S., Korchagin V.O.</i> Classification as the synthesis solution for railroad traction drive transmissions | 73 |
| <i>Samotkanov A.V.</i> Reduction of power losses of the electric drive the cooling fan on traction rolling stock | 81 |

Machine building technology and toolware

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Bobrovskij I.N., Melnikov P.A., Lukyanov A.A., Ezhelev A.V.</i> Fundamental technologies research of the tasks of energy efficiency of machine units | 86 |
| <i>Konoplev A.N., Kropotov Yu.A.</i> System of automated operative calendar plan small–scale production | 91 |

Instrument making and biotechnological system

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Belykh P.M., Novikova I.N., Dunaev A.V., Shuraeva E.V.</i> The control of the effectiveness of orthopaedic tool application through the analysis of microcirculatory–tissue system parameter changes in biotissue | 99 |
| <i>Ivanov Y.B., Ivanov B.R.</i> Photosensors to control pulsed luminous flux with ambient light compensation | 108 |

Control, diagnostics, tests

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Plahotnikova E.V., Protasev V.B.</i> Law of compatibility as base element of upgrading of systems «the electric drive– stop valves» on way toward import substitution | 113 |
| <i>Ariskin E.O., Kuznetsov O.I., Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M.</i> System for measuring parameters of the wind vector helicopter on the based ion–making and aerometric measurement channels | 122 |
| <i>Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Moiseyev V.A.</i> Feasibility study performance the monitoring operations | 133 |
| <i>Mikhailova O.S., Bulaeva N.M., Musikhina E.A.</i> Development of regional models automated expert system | 140 |
| <i>Ryabtsev M.V.</i> Algorithm of diagnosis and operating mode correction for unmanned aerial vehicle flight complex | 148 |
| <i>Lebedev M.A., Kizimov A.T., Targamadze R.Ch.</i> Algorithms for estimating nonlinear stochastic processes in the navigation system is easily unmanned aerial vehicles | 153 |

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.375

В.А. АСКАРОВ

**ОБРАТНАЯ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ
ДЛЯ СОСТАВНОГО ТЕЛА ПРИ ИЗГИБЕ**

Рассматривается составная упругая пластина, состоящая из среды (матрицы) и распределенных в ней одинаковых включений (волокон) из другого упругого материала. Считается, что материал связующей среды ослаблен периодической системой сквозных прямолинейных трещин неравной длины коллинеарных осей абсцисс и ординат. Берега трещин свободны от внешних нагрузок. Составное тело (пластина) подвергается изгибу средними моментами (изгиб на бесконечности). Для решения обратной задачи механики разрушения используется минимизация коэффициентов интенсивности напряжений.

Ключевые слова: составная пластина, связующее, волокна, изгиб, прямолинейные сквозные трещины, коэффициенты интенсивности напряжений, минимизация параметров разрушения.

Рассмотрим составную упругую пластину, состоящую из упругой матрицы и распределенных в ней включений из другого упругого материала. Как известно, подкрепляющие элементы (волокна), сравнительно небольшие по массе, существенно влияют на прочность составной пластины [1, 2]. Как показывает опыт, от идеальной конструкторской геометрии реальные поверхности сечений подкрепляющих волокон отличаются наличием неровностей, являющихся неизбежным следствием процесса их изготовления. Несмотря на малые размеры неровностей, они могут оказывать существенное влияние на несущую способность составного тела. Поэтому исследование влияния параметров неровностей поверхности соединения связующего с волокнами на несущую способность крайне актуально.

На современном этапе развития техники важное значение имеет оптимальное проектирование конструкций и материалов.

Считается, что материал связующей среды ослаблен периодической системой сквозных прямолинейных трещин коллинеарных осей абсцисс и ординат неравной длины. Пусть неограниченная пластина (композит) подвергается изгибу средними моментами (изгиб на бесконечности): $M_x = M_x^\infty$, $M_y = M_y^\infty$, $H_{xy} = 0$.

Периодическая система армированных волокон имеет поперечное сечение близкое к круговому. Обозначим границу раздела различных упругих сред через L'_m ($m = 0, \pm 1, \dots$). Полагаем, что границу L'_m соединения волокна с матрицей можно представить в виде

$$r = \rho(\theta) = \lambda + \varepsilon H(\theta), \quad (1)$$

а центры периодической системы волокон расположены в точках $P_m = m\omega$ ($m = 0, \pm 1, \dots$), $\omega = 2$. Здесь ε – малый параметр, равный R_{\max}/λ ; R_{\max} – наибольшая высота неровности профиля контура L'_m от окружности радиуса $r = \lambda$.

Считается, что всюду на границе соединения сред L'_m имеет место жесткое сцепление материалов. Берега трещин свободны от внешних нагрузок. Принято, что в процессе деформирования составного тела (композита) противоположные берега трещин не входят в контакт. Начало системы координат совмещаем с геометрическим центром круга L_0 ($r = \lambda$) в срединной плоскости пластины. Для оптимизации несущей способности составной пластины

предлагается метод, заключающейся в выборе класса неровностей поверхности поперечного сечения волокна, обеспечивающие повышение несущей способности композита. Таким образом, требуется определить такую геометрию поверхности соединения волокна и связующего, чтобы созданное ею упругое поле препятствовало бы развитию трещин в композите. Очевидно, что чем ниже уровень напряженности в составном теле, тем выше ресурс ее работы. Решению подобных задач механики посвящены работы [3 – 8].

Управляющими переменными принимаем параметры геометрии границы соединения волокон и связующего. Представим границу неизвестного контура L'_0 в виде (1), где функция $H(\theta)$ подлежит определению в процессе решения задачи оптимизации. Не уменьшая общности поставленной задачи оптимизации, принимаем, что искомая функция $H(\theta)$ симметрична относительно координатных осей и может быть представлена в виде отрезка тригонометрического ряда Фурье. Таким образом, задача оптимизации сводится к определению коэффициентов d_{2k} (параметров управления) этого ряда Фурье.

Согласно теории квазихрупкого разрушения Ирвина–Орована параметром, характеризующим напряженное состояние в окрестности кончика трещины, является коэффициент интенсивности напряжений.

Следовательно, ответственной за разрушение материала композита можно считать величину максимального коэффициента интенсивности напряжений в окрестности вершины трещины.

Для нахождения геометрии соединения введем в рассматриваемую задачу в качестве критерия определения геометрии соединения (функции $H(\theta)$) минимизацию коэффициентов интенсивности напряжений. Для предотвращения роста трещин достаточно, чтобы в окрестности вершин трещин все коэффициенты интенсивности напряжений были равны нулю. Это дополнительное условие позволяет определить искомую функцию $H(\theta)$ геометрии соединения материалов.

На основании симметрии граничных условий и геометрии области, занятой упругой средой, компоненты тензора напряжений в связующем являются периодическими функциями с основным периодом ω . Так как решение для связующего обладает свойством периодичности, достаточно рассмотреть условия сопряжения связующего и волокна лишь вдоль контура L'_0 .

Обозначим через: w_0 – прогиб (включения) области S'_0 , ограниченной контуром L'_0 , а w – прогиб пластины вне областей S'_m ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) соприкасания волокон.

Представим эти прогибы через бигармонические функции. Комплексные потенциалы, относящиеся к волокну, обозначим через $\Phi_0(z)$ и $\Psi_0(z)$, а относящиеся к связующему – через $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$. Искомые функции (прогиб, напряжения, моменты, коэффициенты интенсивности напряжений) ищем в виде разложений по малому параметру, в которых пренебрегаем для упрощения членами, содержащими ε в степени выше первой. Каждое из приближений удовлетворяет системе дифференциальных уравнений технической теории изгиба пластин. Значения компонент тензора напряжений (моментов) при $r = \rho(\theta)$ найдем, разлагая в ряд выражения для моментов в окрестности $r = \lambda$.

Используя процедуру метода возмущений, на основании граничных условий рассматриваемой задачи получим [9] краевые условия задачи на контуре L_0 ($\tau = \lambda \exp(i\theta)$) и берегах трещин для комплексных потенциалов:

для нулевого приближения:

$$\begin{aligned} & \Phi^{(0)}(\tau) + \overline{\Phi^{(0)}(\tau)} - \left[\bar{\tau} \Phi^{(0)'(\tau)} + \Psi^{(0)}(\tau) \right] e^{2i\theta} = \\ & = \Phi_0^{(0)}(\tau) + \overline{\Phi_0^{(0)}(\tau)} - \left[\bar{\tau} \Phi_0^{(0)'(\tau)} + \Psi_0^{(0)}(\tau) \right] e^{2i\theta} \quad \text{на } L_0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \overline{\kappa\Phi^{(0)}(\tau)} + \Phi^{(0)}(\tau) - \frac{\tau^2}{\lambda^2} \left[\frac{\lambda^2}{\tau} \Phi^{(0)'(\tau)} + \Psi^{(0)}(\tau) \right] = \\ & = \frac{D_0(1-\nu_0)}{D(1-\nu)} \left\{ \overline{\kappa_0\Phi_0^{(0)}(\tau)} + \Phi_0^{(0)}(\tau) - \frac{\tau^2}{\lambda^2} \left[\frac{\lambda^2}{\tau} \Phi_0^{(0)'(\tau)} + \Psi_0^{(0)}(\tau) \right] \right\}, \\ & \kappa\overline{\Phi^{(0)}(t)} + \overline{\Phi^{(0)}(t)} + t\overline{\Phi^{(0)'(t)}} + \overline{\Psi^{(0)}(t)} = iC^{(0)}, \\ & \kappa\overline{\Phi^{(0)}(t_1)} + \overline{\Phi^{(0)}(t_1)} + t_1\overline{\Phi^{(0)'(t_1)}} + \overline{\Psi^{(0)}(t_1)} = iC_1^{(0)}; \end{aligned} \quad (3)$$

для первого приближения:

$$\begin{aligned} & \Phi^{(1)}(\tau) + \overline{\Phi^{(1)}(\tau)} - \left[\overline{\tau}\Phi^{(1)'(\tau)} + \Psi^{(1)}(\tau) \right] e^{2i\theta} = \\ & = \Phi_0^{(1)}(\tau) + \overline{\Phi_0^{(1)}(\tau)} - \left[\overline{\tau}\Phi_0^{(1)'(\tau)} + \Psi_0^{(1)}(\tau) \right] e^{2i\theta} + f_1 + if_2 \quad \text{на } L_0, \\ & \overline{\kappa\Phi^{(1)}(\tau)} + \Phi^{(1)}(\tau) - \frac{\tau^2}{\lambda^2} \left[\frac{\lambda^2}{\tau} \Phi^{(1)'(\tau)} + \Psi^{(1)}(\tau) \right] = \\ & = \frac{D_0(1-\nu_0)}{D(1-\nu)} \left\{ \overline{\kappa_0\Phi_0^{(1)}(\tau)} + \Phi_0^{(1)}(\tau) - \frac{\tau^2}{\lambda^2} \left[\frac{\lambda^2}{\tau} \Phi_0^{(1)'(\tau)} + \Psi_0^{(1)}(\tau) \right] \right\} + g_1^* + ig_2^*, \\ & \kappa\overline{\Phi^{(1)}(t)} + \overline{\Phi^{(1)}(t)} + t\overline{\Phi^{(1)'(t)}} + \overline{\Psi^{(1)}(t)} = iC^{(1)}, \\ & \kappa\overline{\Phi^{(1)}(t_1)} + \overline{\Phi^{(1)}(t_1)} + t_1\overline{\Phi^{(1)'(t_1)}} + \overline{\Psi^{(1)}(t_1)} = iC_1^{(1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \kappa\overline{\Phi^{(1)}(t)} + \overline{\Phi^{(1)}(t)} + t\overline{\Phi^{(1)'(t)}} + \overline{\Psi^{(1)}(t)} = iC^{(1)}, \\ & \kappa\overline{\Phi^{(1)}(t_1)} + \overline{\Phi^{(1)}(t_1)} + t_1\overline{\Phi^{(1)'(t_1)}} + \overline{\Psi^{(1)}(t_1)} = iC_1^{(1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\tau = \lambda e^{i\theta} + m\omega$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$); ν и ν_0 – коэффициенты Пуассона связующего и волокна, соответственно; $\kappa = -(3 + \nu)/(1 - \nu)$; $\kappa_0 = -(3 + \nu_0)/(1 - \nu_0)$; D и D_0 – цилиндрическая жесткость связующего и волокна; функция $f_1 + if_2$ выражается через функцию $H(\theta)$ и компоненты перемещений на контуре L_0 нулевого приближения; аналогично функция $g_1^* + ig_2^*$ зависит от функции $H(\theta)$ и компонент напряжений при $\tau = \lambda e^{i\theta}$ нулевого приближения; t и t_1 – аффиксы берегов трещин, коллинеарных осей абсцисс и ординат, соответственно; C и C_1 – действительные постоянные, определяемые в ходе решения задачи из условия равенства нулю скачка прогиба в вершинах трещин.

Рассматриваемая задача определения напряженно-деформированного состояния составной пластины сводится в каждом приближении к отысканию двух пар функций $\Phi_0(z)$, $\Psi_0(z)$ и $\Phi(z)$, $\Psi(z)$ комплексного переменного $z = x + iy$, аналитических в соответствующих областях и удовлетворяющим соответствующим граничным условиям (2) и (3) и (4), (5).

Комплексные потенциалы $\Phi_0^{(0)}(z)$ и $\Psi_0^{(0)}(z)$, аналитичны в области S_0 , ограниченной контуром L_0 , и могут быть представлены в виде [9]:

$$\Phi_0^{(0)}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k}^{(0)} z^{2k}, \quad \Psi_0^{(0)}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} b_{2k}^{(0)} z^{2k}. \quad (6)$$

Комплексные потенциалы $\Phi_0^{(0)}(z)$ и $\Psi_0^{(0)}(z)$ в рассматриваемом случае (изгиб на бесконечности) ищем [10] в виде:

$$\begin{aligned} \Phi^{(0)}(z) &= \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z) + \Phi_3^{(0)}(z); \\ \Psi^{(0)}(z) &= \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z) + \Psi_3^{(0)}(z); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Phi_1^{(0)}(z) = \alpha_0^0 + \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2}^0 \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} - \frac{M_x^\infty + M_y^\infty}{4D(1+\nu)}; \quad (8)$$

$$\Psi_1^{(0)}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2}^0 \frac{\lambda^{2k+2} \rho^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} - \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2}^0 \frac{\lambda^{2k+2} S^{(2k+1)}(z)}{(2k+1)!} + \frac{1}{2} \frac{M_y^\infty - M_x^\infty}{D(1-\nu)};$$

$$\Phi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{i\omega(1-\kappa)} \int_L g^{(0)}(t) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(t-z) dt; \quad (9)$$

$$\Psi_2^{(0)}(z) = -\frac{\pi z}{i\omega^2(1-\kappa)} \int_L g^{(0)}(t) \sin^{-2} \frac{\pi}{\omega}(t-z) dt;$$

$$\Phi_3^{(0)}(z) = \frac{1}{\omega(1-\kappa)} \int_{L_1} g_1^{(0)}(t_1) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(it_1 - z) dt_1; \quad (10)$$

$$\Psi_3^{(0)}(z) = \frac{1}{\omega(1-\kappa)} \int_{L_1} \left\{ g_1^{(0)}(t_1) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(it_1 - z) + \left[\operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(it_1 - z) + \frac{\pi}{\omega}(2t_1 + iz) \sin^{-2} \frac{\pi}{\omega}(it_1 - z) \right] g_1^{(0)}(t_1) \right\} dt_1,$$

где $\rho(z) = \left(\frac{\pi}{\omega}\right)^2 \sin^{-2}\left(\frac{\pi}{\omega}z\right) - \frac{1}{3}\left(\frac{\pi}{\omega}\right)^2$; $S(z) = \sum_m' \left[\frac{P_m}{(z-P_m)^2} - \frac{2z}{P_m^2} - \frac{1}{P_m} \right]$; штрих у суммы означает, что при суммировании исключается индекс $m = 0$. Интегралы в (9), (10) берутся по линиям $L = \{[-\ell, -\lambda_1] + [\lambda_1, \ell]\}$, $L_1 = \{[-b, -a] + [a, b]\}$

К основным представлениям (7) – (10) необходимо добавить дополнительные физические условия:

$$\begin{aligned} \int_{-\ell}^{-\lambda_1} g^0(t) dt = 0; & \quad \int_{\lambda_1}^{\ell} g^0(t) dt = 0; \\ \int_{-b}^{-a} g_1^0(t_1) dt_1 = 0; & \quad \int_a^b g_1^0(t_1) dt_1 = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

которые обеспечивают однозначность углов поворота срединной плоскости при обходе контуров трещин.

Удовлетворяя граничным условиям (2) комплексными потенциалами (6) – (10), и используя методы решения, изложенные в [10 – 12], получим бесконечные системы алгебраических уравнений относительно α_{2k+2}^0 , β_{2k+2}^0 , $a_{2k}^{(0)}$, $b_{2k}^{(0)}$ ($k = 0, 1, \dots$), в которые входят посредством интегральных членов искомые функции $g^{(0)}(x)$ и $g_1^{(0)}(y)$. Для их определения используем граничное условие на берегах трещин. Требуя, чтобы комплексные потенциалы (7) – (10) удовлетворяли граничному условию (3), (5), получим два сингулярных интегральных уравнения относительно искомых функций $g^{(0)}(x)$ и $g_1^{(0)}(y)$ нулевого приближения:

$$\frac{1+\kappa}{i\omega(1-\kappa)} \int_L g^{(0)}(t) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{\omega}(t-x) dt + H_*(x) = iC^{(0)}; \quad (12)$$

$$\frac{\pi(1+\kappa)}{i\omega^2(1-\kappa)} \int_{L_1} g_1^{(0)}(t) \left[(t-y) \operatorname{sh}^{-2} \frac{\pi}{\omega}(t-y) \right] dt + N(y) = iC_1^{(0)}, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} H_*(x) &= (1+\kappa)\Phi_4^{(0)}(x) + x\Phi_4^{(0)'}(x) + \Psi_4^{(0)}(x); \\ \Phi_4^{(0)}(x) &= \Phi_1^{(0)}(x) + \Phi_3^{(0)}(x); & \Psi_4^{(0)}(x) &= \Psi_1^{(0)}(x) + \Psi_3^{(0)}(x); \end{aligned}$$

$$N(y) = \kappa \Phi_s^{(0)}(iy) + \overline{\Phi_s^{(0)}(iy)} + iy \Phi_s^{(0)'}(iy) + \overline{\Psi_s^{(0)}(iy)};$$

$$\Phi_s^{(0)}(z) = \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z); \quad \Psi_s^{(0)}(z) = \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z).$$

Для определения постоянной $C^{(0)}$ (в общем случае кусочно–постоянной функции) имеем следующие соотношения [13]:

$$\operatorname{Re} \int_{-\ell}^{-\lambda_1} \bar{t} g^{(0)}(t) dt = 0; \quad \operatorname{Re} \int_{\lambda_1}^{\ell} \bar{t} g^{(0)}(t) dt = 0, \quad (14)$$

обеспечивающие равенство нулю скачка прогиба в вершинах трещин L .

Аналогично, для определения постоянной $C_1^{(0)}$ имеем соотношения:

$$\operatorname{Re} \int_{-b}^{-a} \bar{t}_1 g_1^{(0)}(t_1) dt_1 = 0; \quad \operatorname{Re} \int_a^b \bar{t}_1 g_1^{(0)}(t_1) dt_1 = 0, \quad (15)$$

обеспечивающие равенство нулю скачка прогиба в вершинах трещин L_1 . Удовлетворяя этим условиям (14), (15), находим $C^{(0)} = 0$, $C_1^{(0)} = 0$.

Используя процедуру алгебраизации [14, 15] интегральных уравнений, получим две конечные алгебраические системы уравнений для определения приближенных значений искомых функций $g^{(0)}(x)$ и $g_1^{(0)}(y)$ в узловых точках разбиения интервалов интегрирования. После определения значений функций $g^{(0)}(x)$ и $g_1^{(0)}(y)$ в узловых точках находятся коэффициенты интенсивности напряжений у вершин трещин $x = \ell$, $x = \lambda_1$, $y = a$, $y = b$ в нулевом приближении. После нахождения решения в нулевом приближении можно перейти к решению задачи в первом приближении. Считая формально заданным функцию $H(\theta)$, на основании решения в нулевом приближении находятся функции $f_1 + if_2$ и $g_1^* + ig_2^*$. Комплексные потенциалы $\Phi_0^{(1)}(z)$, $\Psi_0^{(1)}(z)$ и $\Phi^{(1)}(z)$, $\Psi^{(1)}(z)$ ищутся в виде аналогичном (6) – (10) с очевидными изменениями. Дальнейший ход решения краевой задачи (4) – (5) такой же, как в нулевом приближении. При заданной функции $H(\theta)$, полученные алгебраические уравнения являются замкнутыми и позволяют найти напряженно–деформированное состояние композита для каждого профиля поперечного сечения волокна.

Для решения обратной задачи используем условие равенства нулю (минимизации) коэффициентов интенсивности напряжений в окрестности кончиков трещин, т.е. коэффициентами d_{2k} искомой функции $H(\theta)$ надо так распорядиться, чтобы обеспечивалось равенство нулю коэффициентов интенсивности напряжений в кончиках трещин.

Требуем, чтобы коэффициенты интенсивности напряжений K_I^ℓ , $K_I^{\lambda_1}$, K_I^a , K_I^b в вершинах трещин были равны нулю, т.е.:

$$K_I^\ell = 0, \quad K_I^{\lambda_1} = 0, \quad K_I^a = 0, \quad K_I^b = 0. \quad (16)$$

Добавляя эти четыре линейных уравнения (16) к объединенной системе, о которой говорилось выше, получим замкнутую алгебраическую систему для определения всех неизвестных, в том числе и коэффициентов d_{2k} .

Бесконечные системы относительно α_{2k} , β_{2k} в каждом приближении имеют весьма громоздкий вид. Так как $0 < \lambda < 1$, а параметр λ входит в высоких степенях в отмеченные системы, то это упрощает расчеты. В большинстве практически важных случаев каждую из этих систем можно урезать до двух–трех уравнений и несмотря на это, получить практически точные результаты для рабочих диапазонов изменения радиуса λ включения.

Для численной реализации изложенного способа совместно решались упомянутые выше системы. Использовался метод редукции алгебраических систем. Исследовался одно-сторонний изгиб составной пластины постоянными моментами $M_y^\infty (M_x^\infty = 0)$ и всесторонний изгиб моментами $M_x^\infty = M_y^\infty = M_0$. Урезанные системы уравнений решались методом Гаусса с выбором главного элемента в зависимости от радиуса включения. В расчетах было принято для связующего $\nu = 0,28$; $\mu = 2,5 \cdot 10^5$ МПа; для включения $\nu_0 = 0,32$; $\mu_0 = 4,5 \cdot 10^5$ МПа.

В заключении отметим, что построена замкнутая система алгебраических уравнений, позволяющая получить решение задачи оптимального проектирования составного тела (композита) в зависимости от геометрических и механических характеристик связующего и включения (волокна). Оптимальное решение, т.е. найденные коэффициенты d_{2k} функции $H(\theta)$, способствует повышению несущей способности составной пластины.

Таким образом, полученные результаты рассмотренной работы открывают новые возможности оптимального проектирования составных пластин (композитов) за счет выбора формы соединения связующего и волокон (включений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетов, Д.Н. Состояние и тенденции развития деталей машин / Д.Н. Решетов // Вестник машиностроения. – 2000. – №10. – С. 11–15.
2. Фудзии, Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
3. Mirsalimov, V.M. The breaking crack build-up in perforated planes by uniform ring switching / V.M. Mirsalimov, E.A. Allahyarov // Int. J. Fracture. – 1996. – Vol. 79. – № 1. – P. 17–21.
4. Гаджиев, Г.Х. Обратная задача механики разрушения для составного цилиндра контактной пары / Г.Х.Гаджиев, В.М. Мирсалимов // Проблемы механики: сб. ст. к 90-летию со дня рождения А.Ю. Ишлинского / под ред. Д.М. Климова. – М.: Физматлит, 2003. – С. 196–207.
5. Мирсалимов, В.М. Оптимальное проектирование составной пластины, ослабленной периодической системой трещин / В.М. Мирсалимов // Изв. РАН. МТТ. – 2007. – №2. – С. 75–86.
6. Mirsalimov, V.M. Inverse theory of elasticity problem of mounting a disk on a rotating shaft / V.M. Mirsalimov // J. of Machinery Manufacture and Reliability. – 2007. – Vol. 36. – № 1. – P. 35–38.
7. Мирсалимов, В.М. Обратная задача механики разрушения для составного цилиндра/ В.М. Мирсалимов // Изв. РАН. МТТ. – 2009. – № 1. – С. 165–173.
8. Мирсалимов, В.М. Минимизация параметров разрушения в составном теле / В.М. Мирсалимов, К.С. Мамедова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2(19). – С. 65–68.
9. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
10. Мирсалимов, В.М. Разрушение упругих и упругопластических тел с трещинами. Баку: Элм, 1984. – 124 с.
11. Григолюк, Э.И. Перфорированные пластины и оболочки / Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
12. Мирсалимов, В.М. Взаимодействие периодической системы упругих включений и прямолинейных трещин в изотропной среде / В.М. Мирсалимов // ПМТФ. – 1978. – № 1. – С. 164–174.
13. Саврук, М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами / М.П. Саврук. – Киев: Наук. думка, 1981. – 324 с.
14. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
15. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations, Linear and Non-Linear Theory and its Applications in Science and Engineering / E.G. Ladopoulos. – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 553 p.

Аскарв Вусал Али оглы

аспирант Института математики и механики НАН Азербайджана
AZ1141, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9
E-mail: irakon63@hotmail.com

V.A. ASKAROV

PERIODIC INVERSE PROBLEM OF FRACTURE MECHANICS FOR COMPOSITE BODY AT BENDING

A compound elastic plate consisting of a medium (matrix) and distributed in it equal inclusions (fibers) from other elastic material is considered. It is assumed that the material of the binding medium is weakened by periodic system of through rectilinear unequal length cracks collinear to abscissas and ordinates axes. The crack faces are free from external loadings. The compound solid (plate) is exposed to the bending by moments (bending on infinity). For the solution of the inverse fracture mechanics problem the minimization of stress intensity factors is used.

Keywords: compound plate, binding, fibres, bending, rectilinear through cracks, stress intensity factors, minimization of fracture parameters.

BIBLIOGRAPHY

1. Reshetov, D.N. Sostojanie i tendencii razvitiya detalej mashin / D.N. Reshetov // Vestnik mashino–stroeniya. – 2000. – № 10. – S. 11–15.
2. Fudzii, T. Mehanika razrusheniya kompozicionnyh materialov / T. Fudzii, M. Dzako. – M.: Mir, 1982. – 232 s.
3. Mirsalimov, V.M. The breaking crack build–up in perforated planes by uniform ring switching / V.M. Mirsalimov, E.A. Allahyarov // Int. J. Fracture. – 1996. – Vol. 79. – № 1. – P. 17–21.
4. Gadzhiev, G.H. Obratnaja zadacha mehaniki razrusheniya dlja sostavnogo cilindra kontaktojn pary / G.H.Gadzhiev, V.M. Mirsalimov // Problemy mehaniki: sb. st. k 90–letiju so dnja rozhdenija A.Ju. Ishlinskogo / pod red. D.M. Klimova. – M.: Fizmatlit, 2003. – S. 196–207.
5. Mirsalimov, V.M. Optimalnoe proektirovanie sostavnoj plastiny, oslablennoj periodicheskoj sistemoj treshhin / V.M. Mirsalimov // Izv. RAN. MTT. – 2007. – № 2. – S. 75–86.
6. Mirsalimov, V.M. Inverse theory of elasticity problem of mounting a disk on a rotating shaft / V.M. Mirsalimov // J. of Machinery Manufacture and Reliability. – 2007. – Vol. 36. – № 1. – P. 35–38.
7. Mirsalimov, V.M. Obratnaja zadacha mehaniki razrusheniya dlja sostavnogo cilindra/ V.M. Mirsalimov // Izv. RAN. MTT. – 2009. – № 1. – S. 165–173.
8. Mirsalimov, V.M. Minimizacija parametrov razrusheniya v sostavnom tele / V.M. Mirsalimov, K.S. Mamedova // Mehanika mashin, mehanizmov i materialov. – 2012. – № 2(19). – S. 65–68.
9. Mushelishvili, N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoj teorii uprugosti / N. Mushelishvili. – M.: Nauka, 1966. – 707 s.
10. Mirsalimov, V.M. Razrushenie uprugih i uprugoplasticheskih tel s treshhinami. Baku: Jelm, 1984. – 124 s.
11. Grigoljuk, Je.I. Perforirovannye plastiny i obolochki / Je.I. Grigoljuk, L.A. Filshtinskij. – M.: Nauka, 1970. – 556 s.
12. Mirsalimov, V.M. Vzaimodejstvie periodicheskoj sistemy uprugih vključenij i prjamolinejnyh treshhin v izotropnoj srede / V.M. Mirsalimov // PMTF. – 1978. – № 1. – S. 164–174.
13. Savruk, M.P. Dvumernye zadachi uprugosti dlja tel s treshhinami / M.P. Savruk. – Kiev: Nauk. dumka, 1981. – 324 s.
14. Mirsalimov, V.M. Neodnomernye uprugoplasticheskie zadachi / V.M. Mirsalimov. – M.: Nauka, 1987. – 256 s.
15. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations, Linear and Non–Linear Theory and its Applications in Science and Engineering / E.G. Ladopoulos. – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 553 p.

Askarov Vusal Ali oglu

Post–graduate student

Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan

AZ1141, The Republic of Azerbaijan, Baku, st. B. Vahabzadeh 9

E–mail: irakon63@hotmail.com

Н.М. КАЛАНТАРЛЫ

НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЬЦЕВОГО ДИСКА, ОСЛАБЛЕННОГО СИСТЕМОЙ ТРЕЩИН СО СВЯЗЯМИ МЕЖДУ БЕРЕГАМИ В КОНЦЕВЫХ ЗОНАХ

Рассматривается задача механики разрушения для кольцевого диска, ослабленного системой прямолинейных трещин со связями между берегами в концевых зонах, когда на границе диска заданы смешанные граничные условия. Предложена модель разрушения кольцевого диска, основанная на рассмотрении зоны процесса разрушения вблизи кончика трещины. Найдена зависимость предельных внешних нагрузок от длины трещины.

Ключевые слова: кольцевой диск, трещины с концевыми зонами, смешанные граничные условия, связи между берегами, силы сцепления.

Кольцевые диски имеют широкий спектр применения в различных областях промышленности и строительства, в связи с чем, особый интерес имеет исследование напряженно–деформированного состояния и разрушения кольцевых дисков. Этой важной задаче посвящена обширная литература [1, 2]. В настоящей работе предлагается модель разрушения кольцевого диска, в которой принято, что трещины имеют связи между берегами [3–5].

Рассмотрим кольцевой диск, поперечное сечение которого заполняет в плоскости $z = x + iy$ область S , ограниченную окружностью радиуса R_1 извне, и окружностью радиуса R изнутри. Будем рассматривать напряженно–деформированное состояние в кольцевой области S при смешанных граничных условиях. Внутренний контур диска находится под действием нормальной и касательной нагрузок, а внешний контур диска подкреплен жесткой облоймой. Принято, что имеет место плоско–напряженное состояние. Пусть в сечении кольцевого диска имеется произвольная система прямолинейных трещин с концевыми зонами предразрушения. В концевых зонах предразрушения имеются связи между берегами материала. Размеры концевых зон предразрушения заранее неизвестен и требует определения в процессе решения рассматриваемой задачи. Считается, что размер зон предразрушения соизмерим с длиной трещин,

Отнесем кольцевой диск к полярной системе координат $r\theta$ с началом координат в центре концентрических окружности L_1 и L радиуса R_1 и R соответственно (рисунок 1). Выберем в центрах произвольной системы трещин с концевыми зонами предразрушения начала локальных систем координат $x_k O_k y_k$, оси x_k которых совпадают с направлением трещин и образуют угол α_k ($k=1, 2, \dots, N$) с осью x ($\theta = 0$).

Под действием внешней нагрузки на внутренний контур кольцевого диска в концевых зонах предразрушения, соединяющих берега трещин, будут возникать нормальные $q_{y_k}(x_k)$ и касательные $q_{x_k y_k}(x_k)$ напряжения. Таким образом, в концевых зонах предразрушения к берегам трещин приложены нормальные и касательные напряжения, равные соответственно $q_{y_k}(x_k)$ и $q_{x_k y_k}(x_k)$. Вне концевых зон (во внутренних областях трещин) берега трещин свободны от внешних нагрузок.

Граничные условия рассматриваемой задачи механики разрушения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= f_1(\theta); \quad \tau_{r\theta} = f_2(\theta) \quad \text{при } |z| = R, \\ v_r &= 0; \quad v_\theta = 0 \quad \text{при } |z| = R_1, \\ \sigma_{y_k} &= 0; \quad \tau_{x_k y_k} = 0 \quad \text{на } L' \quad (k=1, 2, \dots, N), \\ \sigma_{y_k} &= q_{y_k}; \quad \tau_{x_k y_k} = q_{x_k y_k} \quad \text{на } L''. \end{aligned} \quad (1)$$

$$(2)$$

где $f_1(\theta)$ и $f_2(\theta)$ – внешние напряжения, действующие на внутренней окружности $r = R$;

L' – совокупность свободных от нагрузки берегов трещин;

$L' L''$ – совокупность берегов трещин в концевых зонах предразрушения.

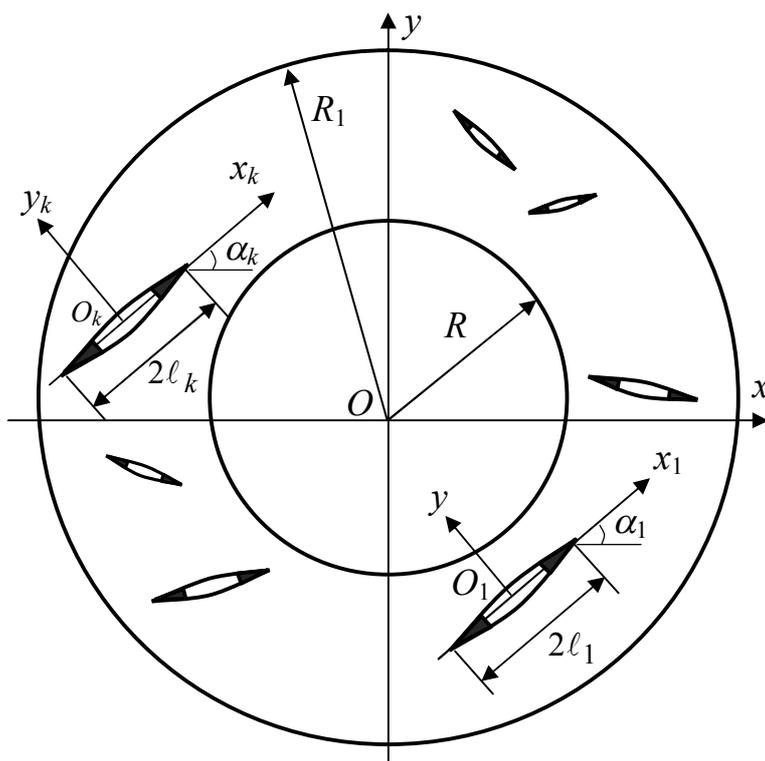


Рисунок 1 – Расчетная схема задачи механики разрушения для кольцевого диска

К основным соотношениям рассматриваемой задачи необходимо добавить уравнения, связывающие перемещения раскрытия берегов концевых зон предразрушения и усилия в связях:

$$\begin{aligned} & (v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0)) - i(u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0)) = \\ & = \Pi(x_k, \sigma_k)(q_{y_k}(x_k) - iq_{x_k y_k}(x_k)) \quad (k = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Pi(x_k, \sigma_k)$ представляет собой эффективную податливость связей, зависящая от натяжения связей;

$\sigma_k = \sqrt{q_{y_k}^2 + q_{x_k y_k}^2}$ – модули вектора усилий в соответствующих связях;

$(v_k^+ - v_k^-)$ – нормальные и $(u_k^+ - u_k^-)$ – касательные составляющие раскрытия берегов зон предразрушения.

При постоянном значении функции Π имеем в соотношении (3) линейный закон деформирования.

Используя формулы Колосова–Мусхелишвили [6], граничные условия (1), (2) запишем в виде краевой задачи для нахождения двух аналитических функций:

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - e^{2i\theta} [\bar{\tau} \Phi'(\tau) + \Psi(\tau)] = f_1(\theta) - if_2(\theta), \quad (4)$$

$$\Phi(\tau_1) - \kappa \overline{\Phi(\tau_1)} - e^{2i\theta} [\bar{\tau}_1 \Phi'(\tau_1) + \Psi(\tau_1)] = 0,$$

$$\Phi(x_k) + \overline{\Phi(x_k)} + x_k \overline{\Phi'(x_k)} + \overline{\Psi(x_k)} = 0 \quad \text{на } L' \quad (5)$$

$$\Phi(x_k) + \overline{\Phi(x_k)} + x_k \overline{\Phi'(x_k)} + \overline{\Psi(x_k)} = q_{y_k} - iq_{x_k y_k} \quad \text{на } L'' \quad (k=1, 2, \dots, N)$$

$$\tau = R e^{i\theta}; \quad \tau_1 = R_1 e^{i\theta}$$

Аналитические функции $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$, описывающие напряженно–деформированное состояние кольцевого диска с системой трещин с концевыми зонами, ищем в виде:

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z) + \Phi_2(z), \quad \Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z) + \Psi_2(z); \quad (6)$$

где
$$\Phi_0(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k z^k; \quad \Psi_0(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k z^k; \quad (7)$$

$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \frac{g_k(t) dt}{t - z_k}; \quad (8)$$

$$\Psi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N e^{-2i\alpha_k} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[\frac{\overline{g_k(t)}}{t - z_k} - \frac{\overline{T_k} e^{i\alpha_k}}{(t - z_k)^2} g_k(t) \right] dt;$$

$$\Phi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[\frac{1 - T_k \overline{T_k}}{T_k (1 - z \overline{T_k})^2} e^{-i\alpha_k} \overline{g_k(t)} - \frac{1}{z(1 - z \overline{T_k})} e^{i\alpha_k} g_k(t) \right] dt; \quad (9)$$

$$\Psi_2(z) = \frac{1}{2\pi z} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left\{ \left[\frac{1}{z T_k} - \frac{1}{z^2} - \frac{1}{z^2 (1 - z \overline{T_k})} + \frac{\overline{T_k}^2}{(1 - z \overline{T_k})^2} \right] e^{i\alpha_k} g_k(t) + \right. \\ \left. + \left[\frac{1 - T_k \overline{T_k}}{z \overline{T_k} (1 - z \overline{T_k})} - \frac{1}{1 - z T_k} - \frac{2(1 - T_k \overline{T_k})}{(1 - z \overline{T_k})^3} \right] e^{-i\alpha_k} \overline{g_k(t)} \right\} dt;$$

$$T_k = t e^{i\alpha_k} + z_k^0; \quad z_k^0 = x_k^0 + i y_k^0; \quad z_k = e^{-i\alpha_k} (z - z_k^0).$$

В общих представлениях (8), (9) $g_k(x_k)$ являются искомыми функциями, характеризующими раскрытие берегов трещин с концевыми зонами предразрушения:

$$g_k(x_k) = \frac{2\mu}{i(1+\kappa)} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0) + i(v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0)) \right] \quad (10) \\ (k=1, 2, \dots, N)$$

Запишем граничные условия (4) на круговых границах области S в виде:

$$\Phi_0(\tau) + \overline{\Phi_0(\tau)} - e^{2i\theta} [\overline{\tau} \Phi_0'(\tau) + \Psi_0(\tau)] = f_1(\theta) - i f_2(\theta) \quad \tau = R e^{i\theta}, \quad (11)$$

$$\Phi_0(\tau_1) - \kappa \overline{\Phi_0(\tau_1)} - e^{2i\theta} [\overline{\tau_1} \Phi_0'(\tau_1) + \Psi_0(\tau_1)] = -(f_1^*(\theta) - i f_2^*(\theta)) \quad \tau_1 = R_1 e^{i\theta},$$

$$f_1^*(\theta) - i f_2^*(\theta) = \Phi_*(\tau_1) - \kappa \overline{\Phi_*(\tau_1)} - e^{2i\theta} [\overline{\tau_1} \Phi_*'(\tau_1) + \Psi_*(\tau_1)],$$

$$\Phi_*(z) = \Phi_1(z) + \Phi_2(z), \quad \Psi_*(z) = \Psi_1(z) + \Psi_2(z) \quad (12)$$

Применяя метод степенных рядов для решения краевой задачи (11), (12), получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов a_k и b_k функций $\Phi_0(z)$ и $\Psi_0(z)$.

Для нахождения неизвестных функций $g_k(x_k)$ используем краевые условия (5) на берегах трещин с концевыми зонами предразрушения. Потребовав, чтобы комплексные потенциалы (6) – (7) удовлетворяли краевым условиям на берегах трещин с концевыми зонами предразрушения при $y_k = 0$, $|x_k| \leq \ell_k$, получим после некоторых преобразований, систему из N комплексных сингулярных интегральных уравнений относительно неизвестных функций $g_k(x_k)$

$$\sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [R_{nk}(t, x) g_k(t) + S_{nk}(t, x) \overline{g_k(t)}] dt = \pi f(x) \quad (k=1, 2, \dots, N), \quad (13)$$

где
$$R_{nk}(t, x) = \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left(\frac{1}{T_k - X_n} + \frac{e^{-2i\alpha_n}}{\overline{T_k} - \overline{X_n}} \right) + \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left[\frac{1}{X_n (X_n \overline{T_k} - 1)} + \frac{1 - T_k \overline{T_k}}{T_k (1 - T_k \overline{X_n})^2} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(T_k \bar{T}_k - 1)(2X_n T_k \bar{X}_n^2 - 3\bar{X}_n T_k + 1) + T_k \bar{X}_n (1 - \bar{X}_n T_k)^2}{T_k \bar{X}_n^2 (T_k \bar{X}_n - 1)^2} e^{-2i\alpha_n} \Big], \\
 S_{nk}(t, x) = & \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[\frac{1}{\bar{T}_k - \bar{X}_n} - \frac{T_k - X_n}{(\bar{T}_k - \bar{X}_n)^2} e^{-2i\alpha_n} \right] + \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left\{ \frac{1}{\bar{X}_n (T_k \bar{X}_n - 1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{1 - T_k \bar{T}_k}{\bar{T}_k (1 - X_n \bar{T}_k)^2} + e^{-2i\alpha_n} \left[\frac{1}{\bar{T}_k \bar{X}_n^2} + \frac{X_n \bar{X}_n (1 - 2\bar{X}_n T_k) + 3\bar{X}_n T_k - 2}{\bar{X}_n^3 (1 - \bar{X}_n T_k)^2} \right] \right\}, \\
 f(x) = & \begin{cases} f_0(x) & \text{на } L' \\ q_{x_k} - iq_{x_k y_k} + f_0(x) & \text{на } L'' \end{cases}, \quad f_0(x) = -[\Phi_0(x) + \overline{\Phi_0(x)} + x\overline{\Phi'_0(x)} + \overline{\Psi_0(x)}].
 \end{aligned}$$

Если трещины в кольцевом диске являются внутренними, к системе сингулярных интегральных уравнений (13) необходимо добавить дополнительные условия:

$$\int_{-\ell_k}^{\ell_k} g_k(x_k) dx_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N), \tag{14}$$

Условия (14) обеспечивают однозначность смещений в кольцевом диске при обходе контура трещины с концевыми зонами предразрушения

Применяя процедуру алгебраизации [7–9] к системе сингулярных интегральных уравнений (13) и к дополнительным условиям (14), получим систему $N \times M$ алгебраических уравнений для определения $N \times M$ неизвестных $g_k(t_m)$:

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \ell_k [\varphi_{0k}(t_m) R_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) + \overline{\varphi_{0k}(t_m)} S_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r)] = f(x_r), \tag{15}$$

$$\sum_{m=1}^M \varphi_{0n}(t_m) = 0,$$

где
$$f(x_r) = \begin{cases} f_0(x_r) & \text{на } L' \\ q_{x_k} - iq_{x_k y_k} + f_0(x_r) & \text{на } L'' \end{cases}$$

$$t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi \quad (m=1, 2, \dots, M), \quad x_r = \cos \frac{\pi r}{M} \quad (r=1, 2, \dots, M-1)$$

Напряжения в кольцевом диске под действием внутренней внешней силовой нагрузок всюду ограничены. Поэтому решение системы сингулярных интегральных уравнений (13) следует искать в классе всюду ограниченных функций. Для существования такого решения необходимо выполнение условий разрешимости краевой задачи, которые в рассматриваемой задаче можно представить в виде:

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m \varphi_{0k}(t_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0 \quad (k=1, 2, \dots, N), \tag{16}$$

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} \varphi_{0k}(t_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0$$

Добавляя к системе алгебраических уравнений $2 \times N$ комплексных уравнения (16), получаем конечную замкнутую комплексную алгебраическую систему для нахождения $N \times M$ неизвестных $\varphi_{0k}(t_m)$ ($k=1, 2, \dots, N$; $m=1, 2, \dots, M$) и $2 \times N$ размеров концевых зон предразрушения.

Для построения недостающих уравнений для определения неизвестных напряжений $q_{y_k}(x_k)$ и $q_{x_k y_k}(x_k)$, входящих в правую часть алгебраической системы (15) используем условие (3). Используя полученное решение условие (3) запишем в виде:

$$\frac{d}{dx_k} \left[\Pi(x_k, \sigma_k) (q_{y_k}(x_k) - iq_{x_k y_k}(x_k)) \right] = \frac{i(1+\kappa)}{2\mu} g_k(x_k) \quad (k=1, 2, \dots, N). \quad (17)$$

Эти комплексные дифференциальные уравнения (17) служат для нахождения напряжений q_{y_k} и $q_{x_k y_k}$ ($k=1, 2, \dots, N$) в связях между берегами зон предразрушения. Используя метод конечных разностей получаем еще систему из $N \times M$ уравнений.

Так как длины d_{1k} и d_{2k} ($k=1, 2, \dots, N$) концевых зон предразрушения неизвестны, алгебраическая система уравнений (15), (16) является нелинейной. Для решения системы (15), (16) использовался метод последовательных приближений и итерационный алгоритм, подобный методу А.А. Ильюшина [5]. В каждом приближении применялся метод Гаусса с выбором главного элемента.

Используя полученное решение задачи, вычислим смещения на краю трещины (у основания зон предразрушения): для правого конца трещины при $x_k = \ell_{0k}$:

$$v_k(\ell_{0k}, 0) - iu_k(\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{\ell_{0k}}^{\ell_k} g_k(x_k) dx_k,$$

для левого конца трещины при $x_k = -\ell_{0k}$:

$$v_k(-\ell_{0k}, 0) - iu_k(-\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{-\ell_{0k}} g_k(x_k) dx_k.$$

где $v_k(x_0, 0) = v_k^+(x_0, 0) - v_k^-(x_0, 0)$;

$u_k(x_0, 0) = u_k^+(x_0, 0) - u_k^-(x_0, 0)$ ($k=1, 2, \dots, N$);

$x_0 = \ell_{0k}$ для правых и $x_0 = -\ell_{0k}$ для левых вершин трещин (у основания концевых зон предразрушения).

Делая замену переменных интегрирования и используя квадратурную формулу Гаусса, находим для правой вершины k -ой трещины:

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{2k}} \sum_{m=1}^{M_{2k}} g_k(t_m) = v_k(\ell_{0k}, 0) - iu_k(\ell_{0k}, 0), \quad (18)$$

для левой вершины k -ой трещины:

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{1k}} \sum_{m=1}^{M_{1k}} g_k(t_m) = v_k(-\ell_{0k}, 0) - iu_k(-\ell_{0k}, 0), \quad (19)$$

где M_{1k} – число узловых точек, принадлежащих отрезку $(-\ell_k, -\ell_{0k})$;

M_{2k} – число узловых точек, содержащихся в отрезке (ℓ_{0k}, ℓ_k) .

Разделяя в соотношениях (18), (19) действительную и мнимую части, находим для правой вершины трещины (у основания концевых зон предразрушения):

$$v_k(\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{2k}} \sum_{m=1}^{M_{2k}} v_k^0(t_m) \quad (k=1, 2, \dots, N),$$

$$u_k(\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{2k}} \sum_{m=1}^{M_{2k}} u_k^0(t_m);$$

для левой вершины трещины:

$$v_k(-\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{1k}} \sum_{m=1}^{M_{1k}} v_k^0(t_m) \quad (k=1, 2, \dots, N),$$

$$u_k(-\ell_{0k}, 0) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{1k}} \sum_{m=1}^{M_{1k}} u_k^0(t_m).$$

Таким образом, для модуля смещений у основания концевых зон предразрушения в кольцевом диске получаем:

для правой вершины k -ой трещины:

$$V_k^r = \sqrt{[v_k(\ell_{0k}, 0)]^2 + [u_k(\ell_{0k}, 0)]^2} = \frac{1 + \kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{2k}} \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad (20)$$

для левой вершины k -ой трещины:

$$V_k^l = \sqrt{[v_k(-\ell_{0k}, 0)]^2 + [u_k(-\ell_{0k}, 0)]^2} = \frac{1 + \kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{1k}} \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad (21)$$

$$A_k = \sum_{m=1}^{M_{2k}} v_k^0(t_m), \quad B_k = \sum_{m=1}^{M_{2k}} u_k^0(t_m),$$

$$C_k = \sum_{m=1}^{M_{1k}} v_k^0(t_m), \quad D_k = \sum_{m=1}^{M_{1k}} u_k^0(t_m) \quad (k=1, 2, \dots, N).$$

В качестве критерия разрушения принят критерий критического раскрытия трещины. Согласно этому критерию рост трещин в кольцевом диске произойдет, когда раскрытие у основания концевых зон предразрушения достигнет критического значения δ_{cr} . Таким образом, условие, определяющее критическое значение внешней силовой нагрузки, действующей на внутренней поверхности кольцевого диска, при котором произойдет рост трещины, имеет вид:

для правой вершины k -ой трещины:

$$V_k^r = \delta_{cr} \quad (k=1, 2, \dots, N),$$

для левой вершины k -ой трещины:

$$V_k^l = \delta_{cr} \quad (k=1, 2, \dots, N).$$

Учитывая соотношения (20), (21), окончательно получаем условие роста трещин в кольцевом диске:

для правой вершины k -ой трещины:

$$\frac{1 + \kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{2k}} \sqrt{A_k^2 + B_k^2} = \delta_{cr} \quad (k=1, 2, \dots, N), \quad (22)$$

для левой вершины k -ой трещины:

$$\frac{1 + \kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M_{1k}} \sqrt{C_k^2 + D_k^2} = \delta_{cr} \quad (k=1, 2, \dots, N). \quad (23)$$

Совместное решение уравнений (15), (16), (22) или (23) позволяет при заданных характеристиках кольцевого диска найти критическую величину внешней нагрузки и размеры концевых зон предразрушения для состояния предельного равновесия, когда трещины начинают расти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саврук, М.П. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. Т.2. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М.П. Саврук. – Киев. На-укова думка, 1988. – 620 с.
2. Саврук, М.П. Численный анализ в плоских задачах теории трещин / М.П. Саврук, П.Н. Осив, И.В. Прокопчук. – М.: Наукова думка, 1989. – 248 с.
3. The special issue: Cohesive models // Eng. Fract. Mech. – 2003. – V. 70, No14. – P. 1741–1987.
4. Мирсалимов, В.М. К решению задачи механики контактного разрушения о зарождении и развитии трещины со связями между берегами во втулке фрикционной пары / В.М. Мирсалимов // Прикладная математика и механика. – 2007. – Т. 71. – Вып. 1. – С. 132 – 151.
5. Калантарлы, Н.М. Влияние объемных сил на зарождение трещины в круговом диске / Н.М. Калантарлы // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2. – С. 17 – 22.
6. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
7. Каландия, А.И. Математические методы двумерной упругости / А.И. Каландия. – М.: Наука, 1973. – 304 с.
8. Мирсалимов, В.М. Неодномерные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
9. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. – Киев, Наукова думка, 1976. – 443 с.

Калантарлы Наиля Мерадж кызы

кандидат физико–математических наук, доцент

докторант

Институт математики и механики НАН Азербайджана

AZ1141, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9

E–mail: nailyak1975@gmail.com

N.M. KALANTARLY

STRESS–STRAIN STATE OF AN ANNULAR DISK, WEAKENED BY SYSTEM OF CRACKS WITH BONDS BETWEEN THE FACES IN THE END ZONES

The fracture mechanics problem for an annular disc, weakened by a system of rectilinear cracks with bonds between the faces in the end zones when on the boundary of the disk the mixed boundary condition are given is considered. A fracture model for the annular disk, based on the consideration of the fracture process zone near the crack tip is proposed. The dependence of marginal external loads on the crack length is found.

Keywords: annular disc, cracks with end zones, mixed boundary conditions, bonds between the faces, cohesive forces.

BIBLIOGRAPHY

1. Savruk, M.P. Mehanika razrusheniya i prochnost materialov: Sprav. posobie. T.2. Kojefficienty intensivnosti naprjazhenij v telah s treshhinami / M.P. Savruk. – Kiev. Na–ukova dumka, 1988. – 620 s.
2. Savruk, M.P. Chislennyj analiz v ploskih zadachah teorii treshhin / M.P. Savruk, P.N. Osiv, I.V. Prokopchuk. – M.: Nauk. dumka, 1989. – 248 s.
3. The special issue: Cohesive models // Eng. Fract. Mech. – 2003. – V. 70, No14. – P. 1741–1987.
4. Mirsalimov, V.M. K resheniju zadachi mehaniki kontaktnogo razrusheniya o zarozhdenii i razvitii treshhiny so svjazjami mezhdru beregami vo vtulke frikcionnoj pary / V.M. Mirsalimov // Prikladnaja matematika i mehanika. – 2007. – t. 71. – vyp. 1. – S. 132 – 151.
5. Kalantarly, N.M. Vlijanie ob#emnyh sil na zarozhdenie treshhiny v krugovom diske / N.M. Kalantarly // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 2. – S. 17 – 22.
6. Mushelishvili, N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoj teorii uprugosti / N.I. Mushelishvili. – M.: Nauka, 1966. – 707 s.
7. Kalandija, A.I. Matematicheskie metody dvumernoj uprugosti / A.I. Kalandija. – M.: Nauka, 1973, – 304 s.
8. Mirsalimov, V.M. Neodnomernye uprugoplasticheskie zadachi / V.M. Mirsalimov. – M.: Nauka, 1987, – 256 s.
9. Panasjuk, V.V. Raspredelenie naprjazhenij okolo treshhin v plastinah i obolochkah. / V.V. Panasjuk, M.P. Savruk, A.P. Dacyshin. – Kiev, Naukova dumka, 1976, – 443 s.
10. Iljushin, A.A. Plastichnost. / A.A. Iljushin. – M., L.: Gostehizdat., 1948. – 376 s.

Kalantarly, Nailya Merach kizi

Ph.D. in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor,

Doctorant,

Institute of Mathematics and Mechanics of NAN of Azerbaijan, Baku

AZ1141, Azerbaijan Republic, to Mr. Buck, B. Vakhabzade St., 9

E–mail: nailyak1975@gmail.com

СВЯЗЬ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ТВЕРДОГО РАСТВОРА С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ КОМПОНЕНТ

Модули упругости (модуль Юнга и модуль сдвига) твердых растворов обычно считаются пропорциональными аналогичным характеристикам их элементов с коэффициентами пропорциональности, совпадающими с объемной долей элемента в материале. В данной работе показано, что связь упругих модулей среды с концентрацией составляющих ее элементов (концентрационная зависимость) является полиномиальной. Это соответствует известным экспериментальным данным.

Ключевые слова: твердый раствор, модули упругого состояния, концентрационная зависимость, нелокальное потенциальное взаимодействие.

Интенсивное развитие современной промышленности невозможно без создания новых материалов с заданными механическими свойствами. Разработка композиционных материалов может базироваться на подборе компонент с необходимыми свойствами. В работе [1] приводятся теоретико-экспериментальные положения, позволяющие определить механические и адгезионные свойства композитных материалов и их изменение с помощью внешнего энергетического поля. Это свидетельствует об актуальности теоретических оценок характеристик механических свойств композиционных материалов и сплавов по известным характеристикам этих свойств их компонент.

Концентрационная зависимость механических свойств материалов сложного состава описывается несколькими моделями (Фойгт, Рейс, Хирш-Поуджель, Попович, Коэнтон, Баге Непер-Чеместен) [2, 3]. Каждая из этих зависимостей имеет вполне определенный аналитический вид и для определенных ситуаций они достаточно точно описывают экспериментальные данные. Но они не могут учесть все разнообразие наблюдаемых концентрационных зависимостей.

Например, в работе [4] представлены экспериментально построенные концентрационные зависимости модулей Юнга и сдвига для сегнетоэлектрического керамического твердого раствора $Li_x Na_{1-x} Ta_{0,1} Nb_{0,9} O_3$, в котором изменялся параметр x , характеризующий относительную концентрацию лития и натрия (рисунок 1).

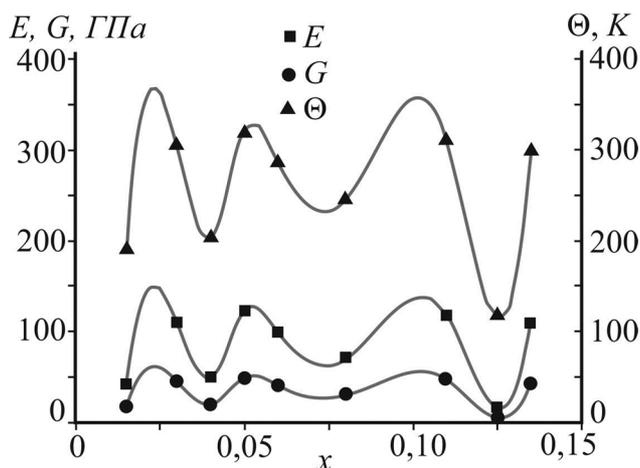


Рисунок 1 – Концентрационные зависимости:

■ – модуль Юнга (E), ● – модуль сдвига (G),
▲ – температуры Дебая (Θ) $Li_x Na_{1-x} Ta_{0,1} Nb_{0,9} O_3$ при комнатной температуре

Авторы, опираясь на результаты работ [5, 6], попытались количественно описать и объяснить зависимость механических свойств от концентрации элементов твердого раствора или композиционного материала. Работа [5] содержит модель упругой среды, согласно кото-

рой частицы среды взаимодействуют между собой с помощью далекодействующих потенциальных сил. Предполагается наличие парных, тройных и т.д. взаимодействий. Определяющим соотношением в данной модели является зависимость объемной плотности потенциала взаимодействия частиц от расстояния между ними, которая предполагается известной, не обязательно квадратичной функцией. Работа [6] описывает контактное взаимодействие двух упругих тел на основании модели [5] и предположения о том, что частицы одного из контактирующих тел находятся под влиянием частиц другого тела.

Данная работа, по аналогии с [5, 6], опирается на предположение об относительных смещениях частиц среды. Эти смещения раскладываются в ряды по внешним степеням радиус-векторов относительных положений взаимодействующих частиц в отсчетном состоянии.

Отличие от работ [5, 6] заключается в следующем. Учитывая, что расстояния между частицами элементов гетерогенной структуры внутри ее представительной частицы малы, в данных разложениях можно ограничиться только первым членом. Это равносильно классическому предположению линейной теории упругости о том, что элементарное волокно сплошной среды, прямолинейное до деформации, остается таким и после нее, меняя лишь длину и ориентацию.

Рассмотрим тело B объема V , которое состоит из двухкомпонентного материала. Представительная частица dB объема dV в этом случае состоит из частицы dB_x с объемом dV_x одного материала и частицы dB_{1-x} с объемом dV_{1-x} другого материала. Объемы всех частиц удовлетворяют равенству:

$$dV = dV_x + dV_{1-x}, \quad dV_x = x dV, \quad dV_{1-x} = (1-x) dV.$$

Обозначим \vec{r} , \vec{r}_x , \vec{r}_{1-x} – радиус-векторы центров инерции частиц dB , dB_x и dB_{1-x} соответственно в их отсчетном состоянии, а \vec{R} , \vec{R}_x , \vec{R}_{1-x} – в текущем. Перемещения центров инерции равны $\vec{u} = \vec{R} - \vec{r}$, $\vec{u}_x = \vec{R}_x - \vec{r}_x$, $\vec{u}_{1-x} = \vec{R}_{1-x} - \vec{r}_{1-x}$. Компоненты распределены по объемам dV_x и dV_{1-x} равномерно. Поэтому:

$$\vec{r} = x \vec{r}_x + (1-x) \vec{r}_{1-x}.$$

Ввиду малости размеров областей dV_x и dV_{1-x} , а также гладкости полей перемещений $\vec{u}_x = \vec{u}_x(\vec{r}_x)$ и $\vec{u}_{1-x} = \vec{u}_{1-x}(\vec{r}_{1-x})$ можно записать:

$$\begin{aligned} \vec{r}_x &= \vec{r} + \delta_x, \quad \delta_x \rightarrow 0, & \vec{r}_{1-x} &= \vec{r} + \delta_{1-x}, \quad \delta_{1-x} \rightarrow 0; \\ \vec{u} &= x \vec{u}_x + (1-x) \vec{u}_{1-x}, & \nabla \vec{u} &= x (\nabla \vec{u}_x) + (1-x) (\nabla \vec{u}_{1-x}). \end{aligned}$$

При этом:

$$\begin{aligned} \vec{u}(\vec{r}_x) &= const, & \vec{u}_{1-x}(\vec{r}_{1-x}) &= const; \\ \vec{r}_x \in dV_x & & \vec{r}_{1-x} \in dV_{1-x} & \\ \nabla \vec{u}(\vec{r}_x) &= const, & \nabla \vec{u}_{1-x}(\vec{r}_{1-x}) &= const. \\ \vec{r}_x \in dV_x & & \vec{r}_{1-x} \in dV_{1-x} & \end{aligned}$$

Пусть среда B бесконечна по всем направлениям и однородна. Считается, что ее частица dB взаимодействует со всеми другими ее частицами dB_1 , dB_2 , dB_3 посредством парных, тройных и т. д. потенциальных сил [5, 7]. Потенциал взаимодействия dB со всем ее окружением в текущем состоянии внутри B определяется равенством:

$$dF = \Phi(\vec{R}) dV = \left[\int_V \Phi^{(2)}(L_1) dV_1 + \int_V dV_2 \int_V \Phi^{(3)}(L_1, L_2) dV_1 + \dots \right] dV,$$

где $L = |\vec{L}_k|$, $\vec{L}_k = \vec{l}_k + \Delta \vec{u}_k$, $\Delta \vec{u}_k = \vec{u}_k(\vec{r}_k) - \vec{u}(\vec{r})$, $\vec{l}_k = \vec{r}_k - \vec{r}$ – радиус-вектор частицы dB_k относительно dB в отсчетном состоянии; $\Phi^{(2)}(L_1)$, $\Phi^{(3)}(L_1, L_2)$ – потенциалы парного взаи-

модействия частицы dB с dB_1 , тройного взаимодействия частицы dB с dB_1 и dB_2 одновременно и т. д., зависящие от расстояний L_1, L_2 и т.д.

В текущем состоянии потенциалы межчастичных взаимодействий можно представить в виде суммы потенциала в отсчетном состоянии и прибавки, вызванной изменением расстояния между ними, в виде полинома второй степени от относительных смещений.

$$\Phi^{(2)}(L_1) = \Phi^{(2)}(l_1) + \left(\frac{d\Phi^{(2)}}{d\vec{l}_1} \right) \cdot (\Delta\vec{u}_1)^T + (\Delta\vec{u}_1) \cdot \left(\frac{1}{2!} \frac{d^2\Phi^{(2)}}{d\vec{l}_1^2} \right) \cdot (\Delta\vec{u}_1)^T,$$

$$\Phi^{(3)}(L_1) = \Phi^{(3)}(l_1) + \sum_{k=1}^2 \left(\frac{d\Phi^{(3)}}{d\vec{l}_k} \right) \cdot (\Delta\vec{u}_k)^T + \sum_{k,m=1}^2 (\Delta\vec{u}_k) \cdot \left(\frac{1}{2!} \frac{d^2\Phi^{(3)}}{d\vec{l}_k d\vec{l}_m} \right) \cdot (\Delta\vec{u}_k)^T.$$

Перемещения $\Delta\vec{u}_k = \vec{u}_k(\vec{r}_k) - \vec{u}(\vec{r}) = \vec{u}_k(\vec{r} + \vec{l}_k) - \vec{u}(\vec{r})$ разлагаются в ряды по степеням \vec{l}_k . В этих разложениях варьируется положение не конечной частицы dB_k , а начальной dB .

Поэтому при вычислении градиента $\frac{d}{d\vec{l}_k}$ используется не приращение $\Delta\vec{l}_k = \Delta\vec{r}_k$, а приращение $\Delta\vec{l}_k = \Delta\vec{r}$. Поэтому $\frac{d}{d\vec{l}_k} = -\frac{d}{d\vec{r}} = -\nabla$.

Потенциалы межчастичного взаимодействия убывают очень быстро [5]. Будем учитывать взаимодействие частицы dB лишь с ближайшими соседями (в разложениях удерживаются первые члены). С учетом этого, пренебрегая начальным напряженным состоянием упругой среды (как это делается в ее классическом линейном варианте [8]), получаем определяющее соотношение линейной теории упругости однородных изотропных материалов.

$$w = \Phi(\vec{R}) - \Phi(\vec{r}) = (\nabla\vec{u}) \cdot C \cdot (\nabla\vec{u})^T. \quad (1)$$

Тензор C , моделирующий свойства материала, определяется равенством:

$$C = \frac{1}{2!} \left[\int_V \left(\vec{l}_1 \frac{d^2\Phi^{(2)}}{d\vec{l}_1^2} \vec{l}_1 \right) dV_1 + \sum_{k,m=1}^2 \int_V \left(\vec{l}_k \frac{d^2\Phi^{(3)}}{d\vec{l}_k d\vec{l}_m} \vec{l}_m \right) dV_1 + \dots \right]. \quad (2)$$

Матрица компонент тензора характеристик механических свойств изотропного линейно упругого материала в ортонормированном базисе $\vec{e}_n, (n = 1, 2, 3)$ имеет вид:

$$\left(C_{(kk)}^{(1,1)Cl} \right)_{ijklm} = \lambda_{(k)} \delta_{ij} \delta_{km} + \mu_{(k)} (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}), \quad (3)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера;

λ и μ – первый и второй параметры Ламэ.

На основании (2) и (3) строим систему линейных алгебраических уравнений, решая которую можно выразить параметры Ламэ через модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

При вычислении изменения потенциальной энергии, вызванного деформированием среды, необходимо учесть, что взаимодействие частицы dB с ее окружением означает взаимодействие с ним каждой из ее частей dB_x и dB_{1-x} . При этом частицы dB_1 и dB_2 и т. д. имеют тот же состав. Значит энергия $w dV$ равна сумме энергий $(w_{xx} + w_{x(1-x)}) dV_x$ и $(w_{(1-x)(1-x)} + w_{x(1-x)}) dV_{1-x}$.

$$w dV = (w_{xx} + w_{x(1-x)}) dV_x + (w_{(1-x)(1-x)} + w_{x(1-x)}) dV_{1-x}, \quad (4)$$

где

$$dV_x = x dV, \quad dV_{1-x} = (1-x) dV, \quad (5)$$

$$w_{\alpha\beta} dV_\alpha = (\nabla\vec{u}_\alpha) \cdot C_{\alpha\beta} \cdot (\nabla\vec{u}_\beta)^T dV_\alpha =$$

$$= (\nabla \bar{u}_\alpha) \cdot \frac{1}{2!} \left[\int_{V_\beta} \left(\bar{l}_1 \frac{d^2 \Phi_{\alpha\beta}^{(2)}}{d\bar{l}_1^2} \bar{l}_1 \right) dV_{\beta 1} + \sum_{k,m=1}^2 \int_{V_\gamma} dV_{\gamma 2} \int_{V_\beta} \left(\bar{l}_k \frac{d^2 \Phi^{(3)}}{d\bar{l}_k d\bar{l}_m} \bar{l}_m \right) dV_{\beta 1} + \dots \right] \cdot (\nabla \bar{u}_\beta)^T, \quad (6)$$

$\alpha, \beta, \gamma = x, 1-x.$

Подставив (5) и (6) в правую часть (4) и сопоставив полученный результат с (1) можно убедиться, что равенство возможно, если допустить, что частицы dB_x и dB_{1-x} испытывают одинаковые деформации: $\nabla \bar{u}_\beta = \nabla \bar{u}_\alpha$. При этом для тензора C появляется концентрационная зависимость в виде полинома, аргументом которого является концентрация x , а коэффициентами являются линейные комбинации интегралов, подобных входящим в квадратные скобки выражения (6). Степень полинома оказывается на единицу больше учтенного количества одновременно взаимодействующих частиц. Так, для описания, представленного на рисунке 1 графика необходим учет 6-частичного взаимодействия.

Рассмотрим для примера сплав меди и цинка. Определим для него зависимость модуля Юнга от концентрации одного материала в другом. Для простоты рассмотрено только парное взаимодействие элементарных частиц. Обычно для сплава эта зависимость считается линейной (рисунок 2).

$$E(c) = (1-c)E_{Cu} + cE_{Zn},$$

где E_{Cu} – модуль Юнга меди,

E_{Zn} – модуль Юнга цинка,

c – концентрация меди в цинке.

Допустим, что между разными частицами внутри материальных тел B и C , а также между частицами, принадлежащими разным телам, существует нелокальное потенциальное взаимодействие. Это взаимодействие может быть парным, тройным и т.д. Будем учитывать только парное взаимодействие между частицами dB и dC , принадлежащими разным телам B и C . Рассмотрим случай, когда каждая из частиц состоит из меди и цинка. При этом потенциал взаимодействия частиц dB и dC :

$$\Phi_{BC} dV_B dV_C = \left[(1-c)^2 \Phi_{ZnZn} + 2c(1-c) \Phi_{CuZn} + c^2 \Phi_{CuCu} \right] dV_B dV_C,$$

где $\Phi_{BC} = (1-c)^2 \Phi_{ZnZn} + 2c(1-c) \Phi_{CuZn} + c^2 \Phi_{CuCu}$ – плотность потенциала.

Модуль Юнга может быть вычислен через параметры Ламэ:

$$\lambda + 2\mu = E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (7)$$

$$\lambda + 2\mu = \int_V l^2 \frac{d^2 \Phi_{BC}}{dl^2} dV_B. \quad (8)$$

Взяв вторую производную от плотности потенциала и подставляя в (8), получим:

$$\frac{d^2 \Phi_{BC}}{dl^2} = (1-c)^2 \frac{d^2 \Phi_{ZnZn}}{dl^2} + 2c(1-c) \frac{d^2 \Phi_{CuZn}}{dl^2} + c^2 \frac{d^2 \Phi_{CuCu}}{dl^2},$$

$$\begin{aligned} \lambda + 2\mu &= (1-c)^2 \left(\int_V l^2 \frac{d^2 \Phi_{ZnZn}}{dl^2} dV_B \right) + 2c(1-c) \left(\int_V l^2 \frac{d^2 \Phi_{ZnCu}}{dl^2} dV_B \right) + c^2 \left(\int_V l^2 \frac{d^2 \Phi_{CuCu}}{dl^2} dV_B \right) = \\ &= (1-c)^2 B_1 + 2c(1-c) B_2 + c^2 B_3. \end{aligned}$$

Из (7) выразим модуль Юнга:

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} (\lambda + 2\mu),$$

$$E = (1-c)^2 E_{Cu} + 2c(1-c) E_{CuZn} + c^2 E_{Zn}.$$

Сопоставление теоретических выводов и экспериментальных результатов приведено на рисунке 3. Сопоставление теории и эксперимента при подобранном значении

$E_{CuZn} \cdot 10^{-11} = 2,7$ и известных значениях $E_{Cu} \cdot 10^{-11} = 1,35 \text{ н/м}^2$, $E_{Zn} \cdot 10^{-11} = 1,00 \text{ н/м}^2$.

Рисунок 3 свидетельствует об удовлетворительном соответствии теоретических расчетов концентрационной зависимости характеристик упругого состояния материала и их измеренных значений.

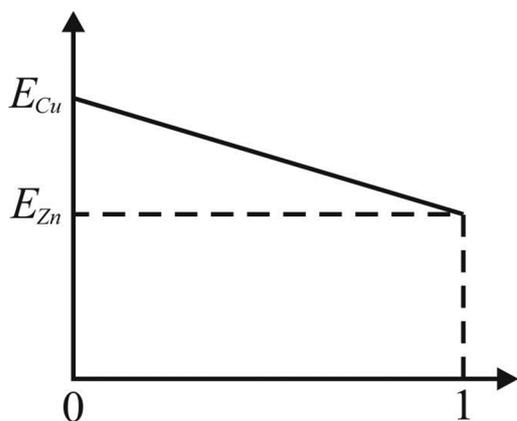


Рисунок 2 – Концентрационные зависимости модуля Юнга сплава Си и Zn

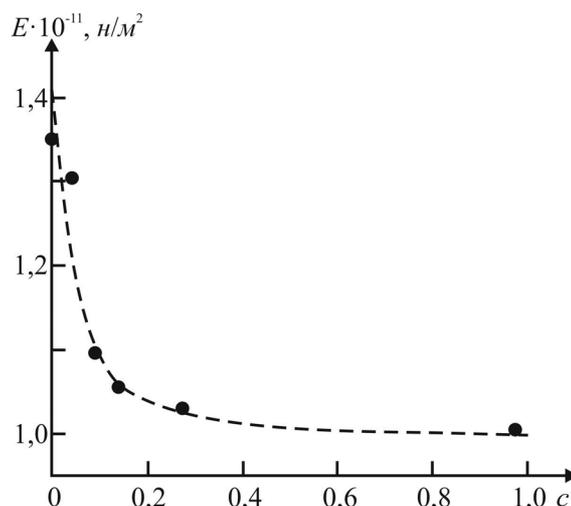


Рисунок 3 – Сопоставление теории и эксперимента: • – эксперимент, ---- теория

В работе представлены теоретические рассуждения, с помощью которых можно объяснить и количественно описать сложный вид концентрационных зависимостей механических характеристик линейно упругих материалов от концентраций составляющих элементов. Приведен расчет концентрационной зависимости модуля Юнга сплава меди и цинка, теоретические выводы сопоставлены с экспериментальными результатами.

Работа [6] свидетельствует о трудности определения потенциала взаимодействия частиц, состоящих из разных материалов. Для этого используются различные правила и методы. Например, параметры потенциалов определяются как средние геометрические или арифметические между параметрами потенциалов взаимодействующих материалов. Результаты данной работы свидетельствуют о том, что обработка данных экспериментов по определению концентрационных зависимостей характеристик упругого состояния твердых растворов на основании теоретических положений данной работы может быть основой определения параметров потенциалов взаимодействия частиц из разных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стухляк, П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, І.Г. Добротвор. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
2. Шермергор, Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред / Т.Д. Шермергор. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
3. Baalbaki, W. On predicting modulus of elasticity in highstrengthconcrete / W. Baalbaki, P.C. Aitcin & G. Ballivy // ACI Materials Journal. – 1992. – Vol. 89(5). – p.p. 517 – 520.
4. Ефремов, В.В. Упругие характеристики сегнетоэлектрических керамических твердых растворов $Li_x Na_{1-x} Ta_{0,1} Nb_{0,9} O_3$ / В.В. Ефремов, Н.В. Сидоров, К. Борманис // Сборник докладов «Актуальные проблемы физики твердого тела». – Минск: изд. Вараксин А.Н. – 2009. – Т. 2. – С. 264 – 266.
5. Шоркин, В.С. Нелинейные дисперсионные свойства высокочастотных волн в градиентной теории упругости / В.С. Шоркин // Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 104 – 121.
6. Фроленкова, Л.Ю. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 235 – 259.
7. Шоркин, В.С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц / В.С. Шоркин/ под ред. И.А. Кийко, Р.А. Васина, Г.Л. Бровко // Упругость и неупругость. Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 95-летию со дня рождения А.А. Ильюшина, 19 – 20 января 2006 г. – М.: Ленанд. – 2006. – С. 271 – 282.
8. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

Мосин Юрий Викторович

ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК,
кандидат физико–математических наук, доцент
кафедры «Физика»,
г. Орел, Наугорское шоссе, 29,
Тел.: (4862) 41–98–44,
E–mail: yamosin@ya.ru

Ромашин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК,
кандидат физико–математических наук, доцент
кафедры «Физика»,
г. Орел, Наугорское шоссе, 29,
Тел.: (4862) 41–98–44,
E–mail: sromashin@yandex.ru

Преснецова Виктория Юрьевна

ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы»,
г. Орел, Наугорское шоссе, 29,
Тел.: (4862) 41–98–44,
E–mail: alluvian@mail.ru

Сами аль Шатеби

ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК,
аспирант кафедры «Физика»,
г. Орел, Наугорское шоссе, 29,
Тел.: (4862) 41–98–44,
E–mail: sami_abud@hotmail.com

YU.V. MOSIN, V.YU. PRESNETCOVA, S.N. ROMASHIN, SAMI AL SHATEBI

COMMUNICATION OF THE ELASTIC MODULES OF THE SOLID SOLUTION WITH A CONCENTRATION OF COMPONENT

Modules of elasticity (Youngs modulus and shear modulus) solid solutions typically are considered proportional to their similar characteristics with proportionality coefficients elements which coincide with the volume fraction of the material element. This paper shows that the connection of the elastic modules of the medium at a concentration of its constituent elements (concentration dependence) is a polynomial. This is consistent with the known experimental data.

Keywords: solid solution, the elastic modulus of the state, the concentration dependence, nonlocal potential interaction.

BIBLIOGRAPHY

1. Stukhlyak, P.D. Yepokskompozitni materiali, modifikovani yenergetichnimi polyami / P.D. Stukhlyak, A.V. Buketov, I.G. Dobrotvor. – Ternopil: Zbruch, 2008. – 208 s.
2. Shermergor, T.D. Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred / T.D. Shermergor. – M.: Nauka, 1977. – 400 s.
3. Baalbaki, W. On predicting modulus of elasticity in highstrengthconcrete / W. Baalbaki, P.C. Aitcin & G. Ballivy // ACI Materials Journal. – 1992. – Vol. 89(5). – Pp. 517 – 520.
4. Yefremov, V.V. Uprugiye kharakteristiki segnetoelektricheskikh keramicheskikh tverdykh rastvorov / V.V. Yefremov, N.V. Sidorov, K. Bormanis // Sbornik dokladov «Aktualnyye problemy fiziki tverdogo tela». – Minsk: izd. Varaksin A.N. – 2009. – T. 2. – S. 264 – 266.
5. Shorkin, V.S. Nelineynyye dispersionnyye svoystva vysokochastotnykh voln v gradiyentnoy teorii uprugosti / V.S. Shorkin // Mekhanika tverdogo tela. – 2011. – № 6. – S. 104 – 121.
6. Frolenkova, L.Yu. Metod vychisleniya poverkhnostnoy energii i energii adgezii uprugikh tel / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. – 2013. – № 1. – S. 235 – 259.
7. Shorkin, V.S. Model sploshnoy uprugoy sredy, osnovannaya na predstavlenii o dalnodeystvuyushchem potentsialnom vzaimodeystvii yeye chastits / V.S. Shorkin/ pod red. I.A. Kiyko, R.A. Vasina, G.L. Brovko // Uprugost i neuprugost. Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma po problemam mekhaniki deformiruyemykh tel, posvyashchennogo 95–letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Ilyushina, 19 – 20 yanvarya 2006 g. – M.: Lenand. – 2006. – S. 271 – 282.
8. Novatskiy, V. Teoriya uprugosti / V. Novatskiy. – M.: Mir, 1975. – 872 s.

Mosin Yuriy Viktorovich

State University – ESPC.
Ph. D. of Physics and Mathematics Sciences, Ass. Professor, Department of «Physics»,
Orel, Naugorskoe shosse, 29,
Ph.: (4862) 41–98–44,
E–mail: yamosin@ya.ru

Romashin Sergey Nikolaevich

State University – ESPC.
Ph. D. of Physics and Mathematics Sciences, Ass. Professor, Department of «Physics»,
Orel, Naugorskoe shosse, 29,
Ph.: (4862) 41–98–44,
E–mail: sromashin@yandex.ru

Presnetsova Victoria Yurievna

State University – ESPC.
Ph. D. of Technical Sciences, Ass. Professor, Department of «Information Systems»,
Orel, Naugorskoe shosse, 29,
Ph.: (4862) 41–98–44,
E–mail: alluvian@mail.ru

Sami al Shatibi

State University – ESPC.
Ph. D. of Physics and Mathematics Sciences, graduate student, Department of «Physics»,
Orel, Naugorskoe shosse, 29,
Ph.: (4862) 41–98–44,
E–Mail: sami_abud@hotmail.com

О.В. ФОМИНОВА, Т.А. БАРБАШОВА, В.И. ЧЕРНЫШЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

В статье приведена методика определения параметров установившихся колебаний виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем по методу гармонического баланса с заданной степенью точности.

Ключевые слова: виброзащита; динамический гаситель; демпфер; управление; метод гармонического баланса.

Метод гармонического баланса позволяет находить приближенные периодические решения нелинейных дифференциальных уравнений с заданной степенью точности [1–5]. Однако при наличии заранее неизвестных и подлежащих определению параметров системы связанных, например, с управлением периодическими процессами переключений параметров упругодемпфирующих и инерционных звеньев, требуется использовать дополнительные соотношения, которые доопределяют нелинейные уравнения метода гармонического баланса [6–10]. В частности, это относится и к виброзащитным системам с динамическим гасителем [11, 12], в которых посредством управления процессом демпфирования стремятся устранить резонансные явления и обеспечить приемлемые амплитуды колебаний присоединенной массы динамического гасителя [10, 13, 14].

Воспользуемся этим методом для определения параметров установившихся колебаний виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем [15]. Полагаем, что возмущающее воздействие – кинематическое и гармоническое, сопротивлением внешней среды можно пренебречь, а управление воспроизводит прерывистый процесс демпфирования вязким сопротивлением [9, 16]. Причем управляемый демпфер и динамический гаситель образуют последовательное соединение – управляемый демпфер расположен между подвижным основанием и присоединенной массой динамического гасителя.

В такой постановке исходные дифференциальные уравнения, которые описывают динамику виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем, как системы с двумя степенями свободы, можно записать в виде [13]:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} + \frac{1}{\eta^2}(\xi - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2}(\xi - \xi_1) = 0, \\ \ddot{\xi}_1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2}(\xi_1 - \xi) + \frac{\varepsilon(\tau)}{\mu\eta}(\dot{\xi}_1 - \cos \tau) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Второе уравнение является нелинейным. Данная нелинейность связана с тем, что управляемый демпфер работает в режиме «включить–выключить», т.е. реализует процесс прерывистого демпфирования:

$$\varepsilon(\tau) = \begin{cases} \varepsilon_0, & \text{если } \dot{\xi}(\xi_1 - \cos \tau) > 0; \\ 0, & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие обозначения безразмерных переменных и параметров:

$\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – смещение, скорость и ускорение защищаемого объекта;

$\xi_1, \dot{\xi}_1, \ddot{\xi}_1$ – смещение, скорость и ускорение динамического гасителя;

τ – безразмерное время;

$\varepsilon(\tau)$ – относительное демпфирование;

η – относительная частота;

λ – отношение жесткостей упругих элементов («присоединенного» к «несущему»);

μ – отношение массы динамического гасителя к массе защищаемого объекта.

Для установившегося режима колебательной системы (в данном случае в пределах периода $T = 2\pi$) зависимость (2) можно переписать в виде:

$$\varepsilon(\tau) = \begin{cases} \varepsilon_0, & \text{если } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \text{ или } \tau_3 \leq \tau \leq \tau_4; \\ 0, & \text{если } 0 < \tau < \tau_1, \tau_2 < \tau < \tau_3 \text{ или } \tau_4 < \tau < T; \end{cases} \quad (3)$$

где τ_1, τ_3 – моменты времени, в которые демпфер включается в работу и $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0$,

τ_2, τ_4 – моменты времени, в которые демпфер выключается из работы и $\varepsilon(\tau) = 0$.

Причем $\tau_3 = \tau_1 + \pi$, $\tau_4 = \tau_2 + \pi$ и, соответственно,

$$\dot{\xi}_1(\tau_1) - \cos \tau_1 = 0, \quad \dot{\xi}_1(\tau_2) = 0. \quad (4)$$

Для описания установившихся колебаний защищаемого объекта и динамического гасителя в рассматриваемой виброзащитной системе будем использовать усеченные тригонометрические ряды:

$$\xi = \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\tau) + B_n \sin(n\tau), \quad \xi_1 = \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\tau) + D_n \sin(n\tau), \quad (5)$$

где N – число членов тригонометрических рядов,

A_n, B_n, C_n, D_n – неизвестные коэффициенты тригонометрических рядов.

Линеаризация диссипативной составляющей производится по следующей схеме:

$$\varepsilon(\tau)(\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \approx \sum_{n=1}^N R_n \cos(n\tau) + S_n \sin(n\tau), \quad (6)$$

где коэффициенты Фурье:

$$R_n(C_n, D_n, \tau_1, \tau_2) = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left\{ \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left\{ \sum_{n=1}^N n[-C_n \sin(n\tau) + D_n \cos(n\tau)] - \cos \tau \right\} \cos(n\tau) d\tau + \right. \\ \left. + \int_{\tau_1 + \pi}^{\tau_2 + \pi} \left\{ \sum_{n=1}^N n[-C_n \sin(n\tau) + D_n \cos(n\tau)] - \cos \tau \right\} \cos(n\tau) d\tau \right\}, \quad (7)$$

$$S_n(C_n, D_n, \tau_1, \tau_2) = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left\{ \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left\{ \sum_{n=1}^N n[-C_n \sin(n\tau) + D_n \cos(n\tau)] - \cos \tau \right\} \sin(n\tau) d\tau + \right. \\ \left. + \int_{\tau_1 + \pi}^{\tau_2 + \pi} \left\{ \sum_{n=1}^N n[-C_n \sin(n\tau) + D_n \cos(n\tau)] - \cos \tau \right\} \sin(n\tau) d\tau \right\}. \quad (8)$$

Теперь система дифференциальных уравнений (1) может быть приближенно заменена линеаризованной системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} + \frac{1}{\eta^2}(\xi - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2}(\xi - \xi_1) = 0, \\ \ddot{\xi}_1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2}(\xi_1 - \xi) + \frac{1}{\mu\eta} \sum_{n=1}^N R_n \cos(n\tau) + S_n \sin(n\tau) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

С учетом соотношений (5), данная система дифференциальных уравнений преобразуется в систему двух трансцендентных уравнений.

$$\begin{cases} -\sum_{n=1}^N n^2 [A_n \cos(n\tau) + B_n \sin(n\tau)] + \frac{1}{\eta^2} \left(\sum_{n=1}^N [A_n \cos(n\tau) + B_n \sin(n\tau)] - \sin \tau \right) + \\ + \frac{\lambda}{\eta^2} \left(\sum_{n=1}^N A_n \cos(n\tau) + B_n \sin(n\tau) - \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\tau) + D_n \sin(n\tau) \right) = 0, \\ -\sum_{n=1}^N n^2 [C_n \cos(n\tau) + D_n \sin(n\tau)] + \frac{1}{\mu\eta} \sum_{n=1}^N R_n \cos(n\tau) + S_n \sin(n\tau) + \\ + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} \left(\sum_{n=1}^N C_n \cos(n\tau) + D_n \sin(n\tau) - \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\tau) + B_n \sin(n\tau) \right) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

После группировки слагаемых трансцендентных уравнений (10) получаем следующую совокупность уравнений:

$$\begin{aligned} A_n \left(-n^2 + \frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} \right) + C_n \left(-\frac{\lambda}{\eta^2} \right) &= 0, \\ B_n \left(-n^2 + \frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} \right) + D_n \left(-\frac{\lambda}{\eta^2} \right) &= \frac{1}{\eta^2} \text{ if } (n=1, 1, 0), \\ A_n \left(-\frac{\lambda}{\mu\eta^2} \right) + C_n \left(-n^2 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} \right) &= -\frac{1}{\mu\eta} R_n(C_n, D_n, \tau_1, \tau_2), \\ B_n \left(-\frac{\lambda}{\mu\eta^2} \right) + D_n \left(-n^2 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} \right) &= -\frac{1}{\mu\eta} S_n(C_n, D_n, \tau_1, \tau_2). \end{aligned} \quad (11)$$

Используем также тригонометрические ряды (5) для преобразования соотношений (4) к следующему виду:

$$\sum_{n=1}^N n [-C_n \sin(n\tau_1) + D_n \cos(n\tau_1)] - \cos(\tau_1) = 0, \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N n [-A_n \sin(n\tau_2) + B_n \cos(n\tau_2)] = 0. \quad (13)$$

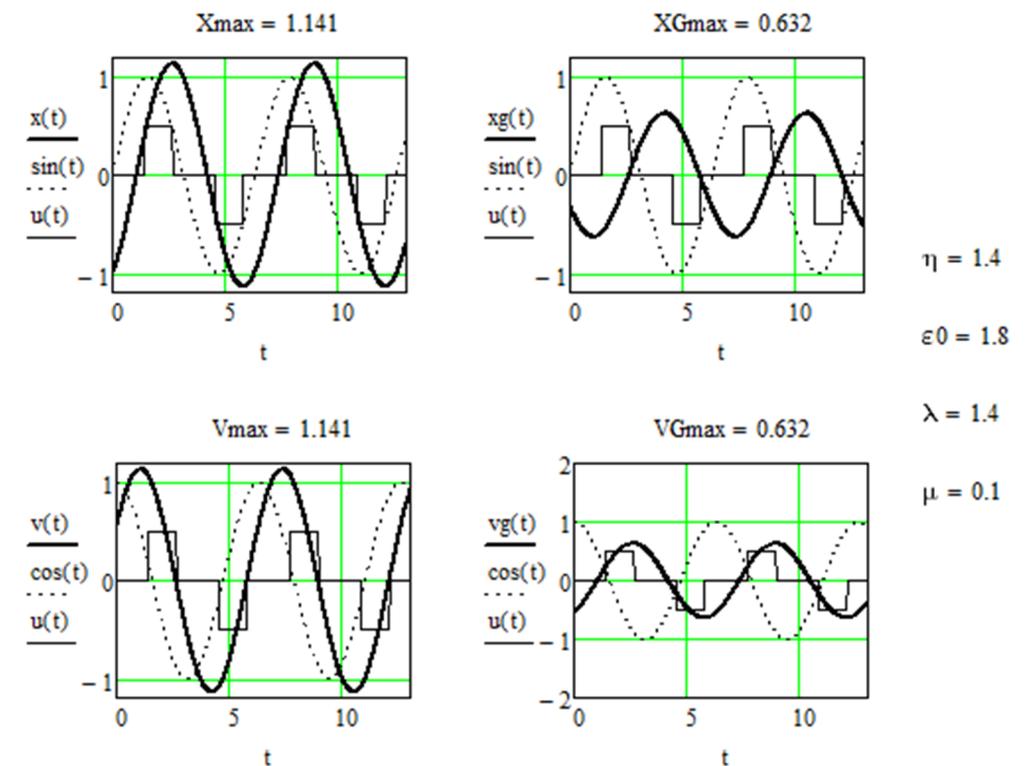
Совокупность полученных уравнений (11), (12) и (13) является замкнутой относительно неизвестных параметров $A_n, B_n, C_n, D_n, \tau_1, \tau_2$.

Поскольку установившийся процесс колебаний виброзащитной системы в пределах периода является кососимметричным, то при решении полученной замкнутой системы уравнений следует учитывать только нечетные составляющие, т.е. принимать $n = 1, 3, 5, \dots$

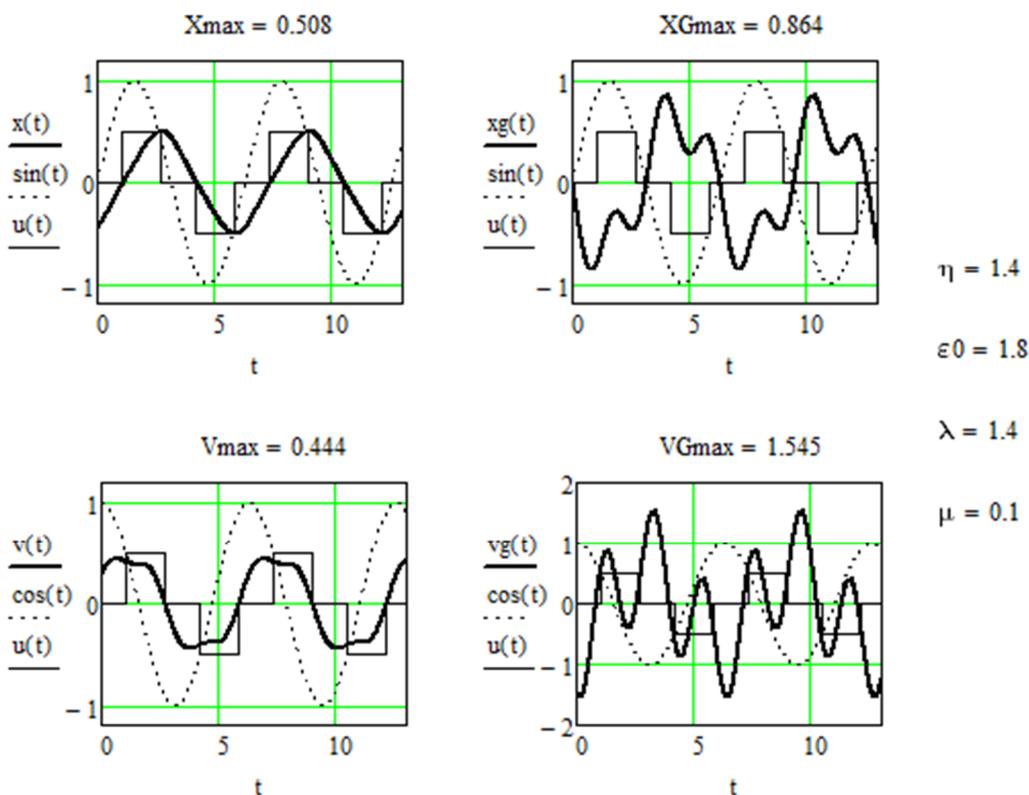
На рисунках 1 и 2 приведены выборочные решения системы уравнений (11) – (13) в среде Mathcad [17] в виде графиков компонент состояния системы виброзащиты и прерывистого демпфирования, коррелированного по знаку со скоростью динамического гасителя относительно подвижного основания.

В результате анализа полученных результатов установлено, что достаточная для практического использования точность воспроизведения реальных динамических процессов в не-

линейной системе виброзащиты данного типа обеспечивается при учёте первых трех (нечетных) слагаемых в разложении (5).



а)



б)

Рисунок 1 – Графики расчетных зависимостей:

а) при $n = 1$; б) при $n = 3$

$$x(t) \leftrightarrow \xi; \quad v(t) \leftrightarrow \dot{\xi}; \quad xg(t) \leftrightarrow \xi_1; \quad vg(t) \leftrightarrow \dot{\xi}_1; \quad u(t) \leftrightarrow \varepsilon(t) \cdot \text{sign}(\dot{\xi}_1 - \cos t)$$

Из приведенных графиков расчетных зависимостей также следует, что на опорной относительной частоте $\eta = 1,4$ прерывистый процесс демпфирования (2) обеспечивает снижение амплитуды колебаний защищаемого объекта по сравнению с амплитудой колебаний подвижного основания практически в три раза.

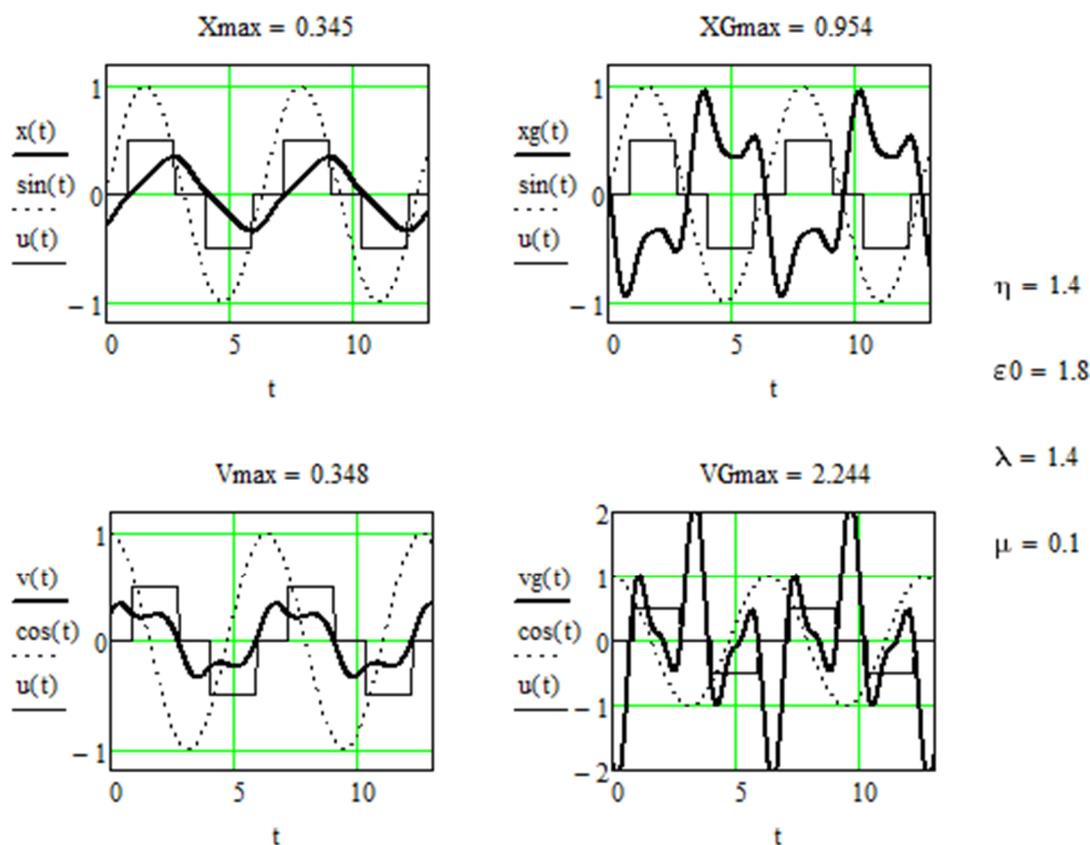


Рисунок 2 – Графики расчетных зависимостей при $n = 5$

$$x(t) \leftrightarrow \xi; v(t) \leftrightarrow \dot{\xi}; xg(t) \leftrightarrow \xi_1; vg(t) \leftrightarrow \dot{\xi}_1; u(t) \leftrightarrow \varepsilon(t) \cdot \text{sign}(\dot{\xi}_1 - \cos t)$$

При этом амплитуды колебаний присоединенной массы (динамического гасителя) не превышают амплитуды колебаний подвижного основания. Последнее обстоятельство позволяет упростить задачу компоновки собственно динамического гасителя в ограниченном пространстве системы виброзащиты за счет соответствующей настройки её параметров.

Таким образом, доказано, что в рамках объектно–ориентированной методики использования метода гармонического баланса можно определить не только параметры установившихся колебаний виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем с заданной степенью точности, но также почти оптимальные параметры прерывистого демпфирования, как управляющего воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман, В.Л. Прикладная теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 416 с.
2. Вибрации в технике. Справочник. В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
3. Ильин, М.М. Теория колебаний: учеб. для вузов / М.М. Ильин, К.С. Колесников. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 271 с.
4. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
5. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: КомКнига, 2006. – 440 с.

6. Ивович, В.А. Защита от вибрации в машиностроении / В.А. Ивович, В.Я. Онищенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
7. Кобринский, А.А. Двумерные виброударные системы. Динамика и устойчивость / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука, 1981. – 335 с.
8. Фейгин, М.И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями / М.И. Фейгин. – М.: Наука, 1994. – 288 с.
9. Фомина, О.В. Прерывистое демпфирование в системах виброзащиты: основы теории, приложения. Под редакцией Ю.С. Степанова / О.В. Фомина. – М.: Машиностроение–1, 2005. – 256 с.
10. Фомина, О.В. Виброзащитная система с управляемым динамическим гасителем / О.В. Фомина, Т.А. Барбашова, В.И. Чернышев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 5. – С. 3–10.
11. Карамышкин, В.В. Динамическое гашение колебаний. Под ред. К.М. Рагулькиса / В.В. Карамышкин. – Л.: Машиностроение, 1988. – 108 с.
12. Корнев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: теория и технические приложения / Б.Г. Корнев, Л.М. Резников. – М.: Наука, 1988. – 304 с.
13. Фомина, О.В. Выбор и обоснование параметров виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем / О.В. Фомина, Т.А. Барбашова, В.И. Чернышев // *Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст. в 2 ч.* – 2012. – Ч. 2. – С. 221–228.
14. Черноусько, Ф.Л. Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Ремшин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
15. Пат. 122721 Российская Федерация, МПК F16F 15/027 F16F 9/50 Динамический гаситель / О.В. Фомина, Т.А. Барбашова, В.И. Чернышев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК. – № 2012123772/11; заявл. 07.06.2012; опубл. 10.12.2012, бюл. № 34 – 3 с.
16. Фомина, О.В. Экстремальные задачи и оптимизация: введение в теорию непрямого импульсного управления процессами колебаний / О.В. Фомина, Ю.С. Степанов, В.И. Чернышев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 218 с.
17. Ивановский, Р.И. Компьютерные технологии в науке и образовании. Практика применения систем Mathcad Pro / Р.И. Ивановский. – М.: Высшая школа, 2003. – 431 с.

Фомина Ольга Владимировна
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Техническая механика и инженерная графика»
E-mail: sapr@ostu.ru

Барбашова Татьяна Александровна
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
соискатель кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
E-mail: vita68@list.ru

Чернышев Владимир Иванович
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
доктор технических наук, профессор
кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
E-mail: chernyshev_46@mail

O.V. FOMINOVA, T.A. BARBASHOVA, V.I. CHERNISHEV

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE STEADY-STATE OSCILLATION VIBRATION-SHIELDING SYSTEM WITH THE CONTROLLED DYNAMIC EXTINGUISHER BY THE METHOD OF HARMONIC BALANCE

To the article methodology of determination of parameters of the set vibrations of the vibro-protective system is driven with the guided dynamic extinguisher on the method of harmonic balance with the set degree of exactness.

Keywords: *vibration shielding, dynamic extinguisher, damper, control, method of harmonic balance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Biderman, V.L. *Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* / V.L. Biderman. – М.: Vysshaya shkola, 1980. – 416 s.

2. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. V 6 t. T. 2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem / pod red. I.I. Blekhmana. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 352 s.
3. Ilin, M.M. Teoriya kolebaniy: ucheb. dlya vuzov / M.M. Ilin, K.S. Kolesnikov. – M.: Izd-vo MGTU im. Baumana, 2003. – 271 s.
4. Nashif, A. Dempfirovaniye kolebaniy / A. Nashif, D. Dzhouns, Dzh. Khenderson. – M.: Mir, 1988. – 448 s.
5. Timoshenko, S.P. Kolebaniya v inzhenernom dele / S.P. Timoshenko. – M.: KomKniga, 2006. – 440 s.
6. Iovovich, V.A. Zashchita ot vibratsii v mashinostroyenii / V.A. Iovovich, V.YA. Onishchenko. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 272 s.
7. Kobrinskiy, A.A. Dvumernyye vibroudarnyye sistemy. Dinamika i ustoychivost / A.A. Kobrinskiy, A.Ye. Kobrinskiy. – M.: Nauka, 1981. – 335 s.
8. Feygin, M.I. Vynuzhdennyye kolebaniya sistem s razryvnymi nelineynostyami / M.I. Feygin. – M.: Nauka, 1994. – 288 s.
9. Fominova, O.V. Preryvistoye dempfirovaniye v sistemakh vibrozashchity: osnovy teorii, prilozheniya. Pod redaktsiyey Yu.S. Stepanova / O.V. Fominova. – M.: Mashinostroyeniye-1, 2005. – 256 s.
10. Fominova, O.V. Vibrozashchitnaya sistema s upravlyayemym dinamicheskim gasitelem / O.V. Fominova, T.A. Barbashova, V.I. Chernyshev // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 5. – S. 3–10.
11. Karamyshkin, V.V. Dinamicheskoye gasheniye kolebaniy. Pod red. K.M. Ragulkisa / V.V. Karamyshkin. – L.: Mashinostroyeniye, 1988. – 108 s.
12. Korenev, B.G. Dinamicheskiye gasiteli kolebaniy: teoriya i tekhnicheskiye prilozheniya / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. – M.: Nauka, 1988. – 304 s.
13. Fominova, O.V. Vybory i obosnovaniye parametrov vibrozashchitnoy sistemy s upravlyayemym dinamicheskim gasitelem / O.V. Fominova, T.A. Barbashova, V.I. Chernyshev // Upravlyayemye vibratsionnyye tekhnologii i mashiny: sb. nauch. st. v 2 ch. – 2012. – Ch. 2. – S. 221–228.
14. Chernousko, F.L. Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami / F.L. Chernousko, I.M. Ananyevskiy, S.A. Remshin. – M.: Fizmatlit, 2006. – 328 s.
15. Pat. 122721 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16F 15/027 F16F 9/50 Dinamicheskiy gasitel / O.V. Fominova, T.A. Barbashova, V.I. Chernyshev; zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO Gosuniversitet – UNPK. – № 2012123772/11; zayavl. 07.06.2012; opubl. 10.12.2012, byul. № 34 – 3 s.
16. Fominova, O.V. Ekstremalnyye zadachi i optimizatsiya: vvedeniye v teoriyu nepryamogo impulsnogo upravleniya protsessami kolebaniy / O.V. Fominova, Yu.S. Stepanov, V.I. Chernyshev. – M.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2011. – 218 s.
17. Ivanovskiy, R.I. Kompyuternyye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Praktika primeneniya sistem Mathcad Pro / R.I. Ivanovskiy. – M.: Vysshaya shkola, 2003. – 431 s.

Fominova Olga Vladimirovna
State University – ESPC, Orel
Ph.D., Associate Professor «Technical
mechanics and engineering graphics»
E-mail: sapr@ostu.ru

Barbashova Tatiana Aleksandrovna
State University – ESPC, Orel
Postgraduate student of department
«Mechatronics and international en-
gineering»
E-mail: vita68@list.ru

Chernishev Vladimir Ivanovich
State University – ESPC, Orel
Ph.D., professor of department
«Mechatronics and international en-
gineering»
E-mail: chernyshev_46@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 621.91.01

Н.В. КАНАТНИКОВ, Г.А. ХАРЛАМОВ, А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО, Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ

ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ЭТАПЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассматриваются вопросы управления процессом обработки периодических поверхностей деталей машин. Предлагается схема процесса прогнозирования режимов обработки в зависимости от требуемых показателей качества изделия, производительности и стойкости инструмента. Основой данной работы является пространственная математическая модель процесса, позволяющая описать требуемую кинематику, а также определить силы резания.

Ключевые слова: периодический профиль, управление процессом обработки, модель процесса обработки.

Постоянно возрастающие требования к эксплуатационным свойствам деталей приводят к применению новых конструкционных и инструментальных материалов, новых схем процесса обработки, конструкций режущего инструмента. Изменения, вносимые в отработанные технологические процессы, влияют на качество обработки: кроме того, их внедрение требует больших затрат, связанных с разработкой режимов резания. Использование методики управления процессом обработки позволяет не только сократить эти расходы, но и на этапе проектирования рассмотреть возможные варианты обработки и отбросить нерациональные.

Несмотря на большое количество работ, в которых рассматривались теоретические проблемы прогнозирования новых способов обработки и технологий, следует отметить во многих случаях их частный характер, охват весьма узких областей [1], не учитывающий во многих случаях возможности управления параметрами качества получаемых изделий.

Процессы механической обработки обладают типичными свойствами диссипативных систем с той или иной степенью интенсивности, преобразующими механическую энергию в тепловую, энергию трения и энергию пластического деформирования. Управление такими процессами возможно именно потому, что существует довольно широкий диапазон варьирования кинематических параметров режимов резания, параметров режущей части инструмента и параметров установки инструмента на станке. Естественно, что система, позволяющая производить анализ и управление такими процессами должна иметь адекватную гибкость [2, 3].

Проектирование и управление процессами обработки – весьма трудоемкая задача, отличающаяся случайностью связей с прогнозируемыми показателями качества получаемых изделий, значительным количеством вариантов взаимного влияния режимов резания и параметров технологической системы на процесс обработки [4]. Целью данной работы является управление параметрами процессов механической обработки периодических профилей деталей машин в целях повышения эффективности съема припуска и качества деталей.

В качестве основных можно выделить следующие задачи модели процесса обработки периодических профилей: установление влияния на выходные параметры с целью получения оптимального значения этих параметров, определение законов взаимодействия входных и

выходных параметров, выбор величины воздействия на входные параметры с целью поддержания значения выходных параметров [5].

В качестве входных (управляющих) параметров можно выделить: геометрические параметры и материал обрабатываемой детали, режимы обработки, кинематическую схему резания, конструкцию инструмента, станок и др.

Процесс обработки представлен следующими выходными (управляемыми) параметрами, выступающими в качестве первообразной целевой функции – получение требуемого профиля; в качестве частных целевых функций – повышение точности, повышение качества поверхности и производительности процесса, снижение износа инструмента и т.п. В качестве частной функции также можно выделить эксплуатационные свойства деталей машин, связанные с качеством их поверхности и системой параметров их поверхностного слоя [6].

Можно сделать вывод, что при разработке методики управления процессом обработки основной задачей является определение степени влияния различных технологических (оборудования, материала и геометрии заготовки и т.д.) и конструкторско–технологических (конструкции инструмента, кинематики резания и т.д.) параметров системы на показатели качества детали и производительность процесса. Необходим анализ параметров технологической системы, порождающих погрешности обработки и использование результатов анализа для корректного определения параметров качества изделия.

Решение данной задачи позволит прогнозировать результаты обработки и вплотную подводит к решению проблемы управления процессом.

Для перехода от прогнозирования параметров качества обработки к управлению процессом необходимо ввести в систему управляющие параметры, задать управляемые параметры и наложить ограничения на них (рисунок 1).

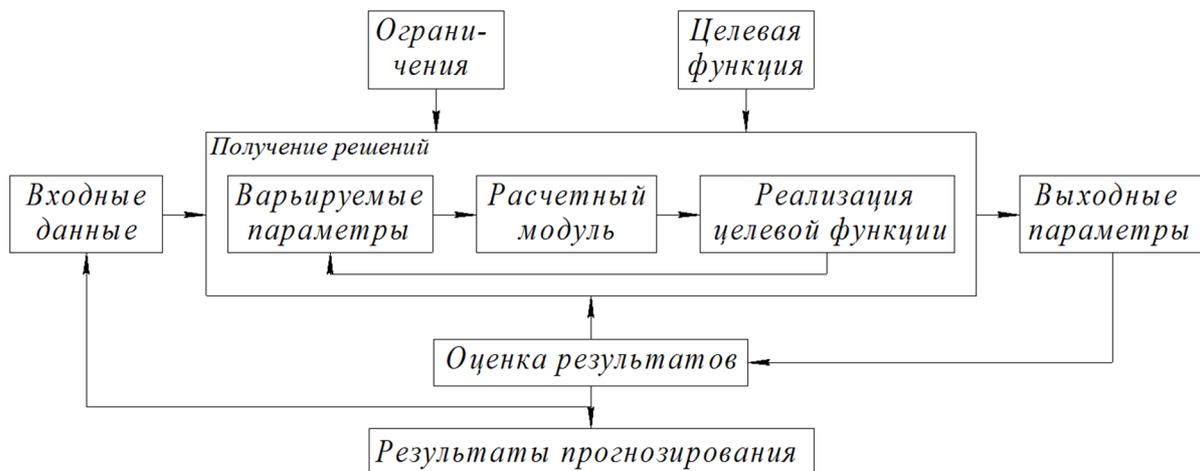


Рисунок 1 – Схема процесса прогнозирования режимов обработки

Для оптимизации значений выходных параметров в схеме предусмотрена подпрограмма, оптимизирующая значения выходных параметров в соответствии с заданными ограничивающими факторами и целевой функцией.

Подробнее рассмотрим блок «Получение решений» (рисунок 2).

Предлагаемая методика управления обработкой периодических профилей основана на анализе виртуальной модели процесса (1). Он позволит произвести расчеты параметров резания – кинематические изменения углов резания, толщин срезаемых стружек на каждом элементарном участке режущего лезвия (2), что дает возможность перейти к детальному анализу процесса обработки – определению изменения осевых составляющих силы резания (3). Данные о динамике процесса в свою очередь позволяют рассчитать управляемые параметры системы: износ режущих лезвий (4), шероховатость обрабатываемой поверхности (5), точность профиля (6), производительность процесса (7).



Рисунок 2 – Схема блока «Получение решений»

Завершающим шагом подпрограммы является проверка достижения целевой функции (8), в случае невыполнения условия происходит корректировка управляющих параметров (в диапазоне допустимых значений).

Как видно из приведенных схем, главным элементом механизма управления является модель процесса обработки. Сущность её заключается в описании перемещения произвольной точки режущего лезвия инструмента в процессе обработки. Модель задается рядом аналитических зависимостей, описывающих конструкцию режущей части инструмента и кинематику движений резания. Это позволяет ещё на этапе технологического проектирования, определить оптимальный вариант обработки и отбросить нерациональные.

Предложенная схема прогнозирования процессов лезвийной обработки позволяет выбрать наиболее удачное сочетание свойств обрабатываемых деталей, параметров процесса и параметров обрабатывающего инструмента.

Использование системных представлений для описания процессов обработки сложных периодических поверхностей резанием позволяет поднять на новую ступень их моделирование. На этом фундаменте базируется возможность получения изделий с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, Р.В. Управление параметрами качества колес с внутренними зубьями незвольвентного профиля. / Р.В. Анисимов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – №4–2. – С. 9–14.
2. Степанов, Ю.С. Шлифование внутренних фасонных поверхностей. / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев, И.И. Колтунов, Д.С. Фомин // Под ред. Ю.С. Степанов. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 262 с.
3. Колтунов, И.И. Управление погрешностями шлифования сложных криволинейных поверхностей / И.И. Колтунов, Ю.С. Степанов, А.С. Тарапанов. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2006. – 156 с.
4. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / А.Г. Суслов, Э.В. Рыжов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

5. Харламов, Г.А. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячно-го типа. / Г.А. Харламов, О.В. Полохин, А.С. Тарапанов. – М: Машиностроение-1, 2006. – 148 с.

6. Харламов, Г.А. Теория проектирования процессов лезвийной обработки. / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М: Машиностроение, 2003. – 252 с.

Канатников Никита Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УПНК»,
г. Орел, Россия
лаборант кафедры «КТМП»
Тел.: +7 (920) 086–57–82;
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

Харламов Геннадий Андреевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УПНК», г. Орел, Россия
доктор технических наук, проф. каф. «КТМП»
Тел.: +7 (4862) 41–65–75;
E-mail: ipk@ostu.ru

Черепенько Аракадий Анатольевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УПНК»,
г. Орел, Россия
доктор технических наук, проф. каф. «КТМП»
Тел.: +7 (906) 665–00–02;
E-mail: awj@list.ru

Татарченков Николай Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УПНК», г. Орел, Россия
Учебный мастер кафедры «Автопласт»
Тел.: +7 (920) 287–89–81
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

N.V. KANATNIKOV, G.A. HARLAMOV, A.A. CHEREPENKO, N.V. TATARCHENKOV

**ABILITY FOR CONTROL THE PROCESSING OF PERIODIC
MACHINE DETAILS SURFACES DURING TECHNOLOGICAL
PREPARATION OF PRODUCTION**

This article discusses the control of the processing of periodic machine parts surfaces. It is offered a scheme of predicting processing modes depending on the required quality product, performance and tool capability. The basis of this work is spatial mathematical model of the process, allowing us to describe the desired kinematics, as well as to determine the cutting force.

Keywords: *periodic profile, control processing, the processing model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Anisimov, R.V. Upravlenie parametrami kachestva koles s vnutrennimi zub'jami nejevol'ventnogo profilja. / R.V. Anisimov, A.S. Tarapanov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii. – 2011. – № 4–2. – С. 9–14.
2. Stepanov, Ju.S. Shlifovanie vnutrennih fasonnyh poverhnostej. / Ju.S. Stepanov, B.I. Afanas'ev, I.I. Koltunov, D.S. Fomin // Pod red. Ju.S. Stepanov. – М.: Mashinostroenie-1, 2005. – 262 s.
3. Koltunov, I.I. Upravlenie pogreshnostjami shlifovanija slozhnyh krivolinejnyh poverhnostej / I.I. Koltunov, Ju.S. Stepanov, A.S. Tarapanov. – М.: Izd-vo Mashinostroenie-1, 2006. – 156 s.
4. Suslov, A.G. Tehnologicheskoe obespechenie jeksplutacionnyh svojstv detalej mashin / A.G. Suslov, Je.V. Ryzhov, V.P. Fedorov. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 176 s.
5. Harlamov, G.A. Issledovanie i proektirovanie processov zubonarezanija instrumentami chervjachno-go tipa. / G.A. Harlamov, O.V. Polohin, A.S. Tarapanov. – М: Mashinostroenie-1, 2006. – 148 s.
6. Harlamov, G.A. Teorija proektirovanija processov lezviyjnoj obrabotki. / G.A. Harlamov, A.S. Tarapanov. – М: Mashinostroenie, 2003. – 252 s.

Kanatnikov Nikita Vladimirovich

State University – ESPC
Ph.D., laboratory, Department of «CTSMM»
Ph.: +7 (920) 086–57–82;
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

Harlamov Gennadiy Andreevich

State University – ESPC
Ph.D., professor Department of «CTSMM»
Ph.: +7 (4862) 41–65–75;
E-mail: ipk@ostu.ru

Cherepenko Arkadiy Anatolevich

State University – ESPC
Ph.D., professor, Department of «CTSMM»
Ph.: +7 (906) 665–00–02;
E-mail: awj@list.ru

Tatarchenkov Nikolay Vladimirovich

State University – ESPC,
Orel, Russia
Master training the department «Avtoplast»
Ph.: +7 (920) 287–89–81
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

В.В. МИХРЮТИН

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЗА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

Предложен алгоритм построения модели геометрического образа обработанной поверхности заготовки при точении криволинейных поверхностей в условиях наличия вибраций в упругой технологической системе.

Ключевые слова: механическая обработка, моделирование процесса резания, модель геометрического образа обработанной поверхности, моделирование шероховатости.

В современном машиностроении наблюдается тенденция усложнения геометрических форм деталей и повышения требований к их качеству. Обработка деталей сложной геометрической формы производится на станках с программным управлением, управляющие программы для которых подготавливаются в автоматизированных системах. Существующие системы подготовки управляющих программ при построении траектории движения инструмента не позволяют учесть всего комплекса изменяющихся условий обработки, что приводит к снижению эффективности технологического процесса и получения неравномерного качества формообразуемой поверхности. Это обусловлено тем, что в процессе обработки поверхностей с криволинейной образующей происходит непрерывное изменение кинематических параметров процесса резания.

Формирование поверхностного слоя изделия на стадии изготовления является важнейшим этапом в инженерии поверхности [1]. Использование математической модели процесса на стадии технологической подготовки производства позволяет выбрать рациональные параметры обработки и сократить затраты на проведение дорогостоящих экспериментальных исследований.

Данная работа посвящена решению задачи разработки математической модели геометрического образа шероховатой поверхности, получаемой при точении деталей, имеющих форму тел вращения с криволинейной образующей с учетом вибраций в упругой технологической системе. Модель строится при объединении математических моделей, описывающих режущую кромку инструмента произвольной формы, перемещение инструмента относительно заготовки, формирования сечения среза и последующего отсечения поверхностей. Создание данной модели продолжает работы в направлении создания комплексной модели процессов резания [2].

Моделирование кинематического взаимодействия инструмента и заготовки ввиду большого разнообразия видов режущего инструмента, изменения формы сечения среза при варьировании режимных параметров обработки достаточно затруднено. Трудности создания зависимостей связаны с тем, что режущая кромка может описываться на разных участках несколькими сегментами кривых. Причем, сечение среза может быть ограничено различными их сегментами в зависимости от величины подачи. Задача описания профиля режущих кромок встречается также при расчете параметров сечения среза.

Наиболее распространенные модели определения геометрических параметров сечения среза в зависимости от величины подачи и формы режущей кромки используют выбор соответствующих расчетных зависимостей даже для стационарных условий, возникающих при точении цилиндрических поверхностей. Например, в работе [3] для описания геометрии сечения среза в условиях продольного точения затупленным инструментом с радиусом при вершине выделено 37 различных схем срезания припуска, для каждой из которых выведены свои расчетные зависимости.

В работе [4] предложены математические модели для расчета геометрических параметров лезвия режущего инструмента, при этом используется уравнение режущей кромки инструмента, заданной в параметрической форме. Однако при расчете параметров сечения

среза для инструментов с различной формой режущих кромок рассматривается также несколько схем срезания припуска.

В известных работах для расчета параметров формообразования используются модели, ограничивающие возможности варьирования геометрии инструмента только изменением углов и радиусов. При изменении числа и формы сегментов кривых, описывающих режущие кромки необходимо проводить каждый раз новое аналитическое исследование. При описании процесса точения криволинейных поверхностей данный подход требует также учета траектории движения инструмента, что приводит к появлению большого количества схем резания, математическое описание и программная реализация которых в компьютерных системах весьма трудоемка.

В работах [5, 6] был предложен подход, основанный на описании режущей кромки в основной плоскости кусочно–определенной функцией. Данное уравнение могло быть составлено из сегментов кривых для режущей кромки произвольной формы, а затем использовано для вычисления площади сечения среза. Уравнения, приведенные в [5, 6], содержали в себе переменные, задающие подачу, поэтому данная модель была ориентирована в основном на расчет площади сечения среза.

При дальнейшем развитии данной модели в работах [7, 8] было предложено задавать режущую кромку в пространстве и производить построение поверхности резания с использованием уравнения формообразования, создаваемом на основе анализа формулы структурной компоновки станка [9]. Данная модель позволяла уже решать задачу формообразования при сложном движении инструмента относительно заготовки, в том числе при колебаниях в направлении скорости главного движения.

В данной работе решается задача разработки математической модели кинематического взаимодействия инструмента и заготовки при точении поверхностей вращения с криволинейной образующей, позволяющая рассчитывать параметры микрогеометрии с учетом сложного движения инструмента за счет вибраций в упругой технологической системе. Она продолжает также развитие модели режущих кромок инструмента, разработанной в [7, 8].

Данная задача решается при объединении математических моделей, описывающих режущую кромку инструмента произвольной формы, перемещение инструмента относительно заготовки и модели формирования сечения среза. Взаимодействие моделей осуществляется на основе специально разработанного алгоритма, позволяющего моделировать процесс формообразования обработанной поверхности заготовки и определять кинематические параметры взаимодействия ее с инструментом [10].

Режущая кромка описывается уравнениями, задающими кривые в статической системе координат (ССК) инструмента (рисунок 1). Оси ССК определяются на основе следующих правил. Расположение и направление оси z выбирается по направлению вектора скорости главного движения инструмента относительно заготовки, направление оси x производится по наиболее вероятному направлению подачи при обработке [8].

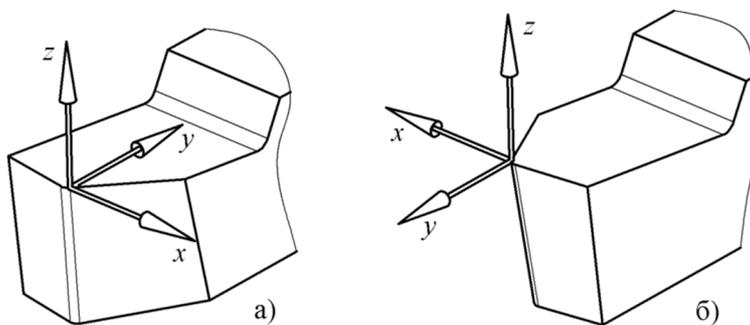


Рисунок 1 – Расположение координатной системы реза:
а) – правый резец, б) – левый резец

Уравнение режущей кромки имеет вид:

$$K(t, i) = K_i(t - i), t \in (0, \dots, n + 1), i = 0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

где t – безразмерный параметр кривой;

i – номер режущей кромки лезвия;

n – число сегментов составной кривой, описывающей режущую кромку лезвия.

Каждая кривая $K_i(t)$, описывающая режущую кромку с номером i , должна быть реализована для безразмерного параметра в пределах $t \in [0, 1]$. Для определенности выбора нужной кромки лезвия с числом кромок n параметр функции задается изменяющимся в пределах $t \in [0, n + 1]$. Выражения для функций $K_i(t)$ определяются геометрией конкретного вида инструмента и наиболее удобным способом задания кривых. Использование параметра i в аргументах функции позволяет выбирать соответствующую кривую при поиске точек пересечений.

Касательная к режущей кромке задается уравнением:

$$K'(t, i) = K'_i(t - i), t \in (0, \dots, n + 1), i = 0, 1, \dots, n.$$

Колебания инструмента в трех взаимно перпендикулярных плоскостях задаются матрицей:

$$\delta(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ – перемещения инструмента по осям x, y, z при наличии колебаний.

Расчет перемещений инструмента относительно заготовки производится на основе методики, изложенной в работе [9]. Уравнение поверхности резания в системе координат заготовки с учетом колебаний инструмента:

$$R(t, \tau) = M_c(\tau)\delta(\tau)\Phi_n K(t), \quad (2)$$

где M_c – матрица преобразования, описывающая перемещение инструмента относительно заготовки за счет координатных перемещений узлов станка;

Φ_n – матрица формы [9] для инструмента;

τ – системное время процесса;

$\delta(t)$ – матрица, описывающая движения инструмента при колебаниях.

Матрица формы инструмента Φ_n задает преобразование координат, переводящее модель его геометрического образа в систему координат станка. Уравнение (2) определяет положение линии, моделирующей режущую кромку относительно модели геометрического образа заготовки. Далее для сокращения будем называть линию, моделирующую режущую кромку просто режущей кромкой, а модель геометрического образа заготовки – заготовкой.

Уравнение движения режущей кромки составляется в системе координат заготовки в соответствии с [9]. Наиболее распространенные токарные станки имеют компоновку, выражаемую структурной формулой $COZX$, для которой матрица преобразования, задающая перемещение инструмента относительно заготовки может быть записана следующим образом:

$$M_c(\tau) = \Phi_c R_z(\tau) \Phi_z T_z(\tau) \Phi_x T_x(\tau),$$

где Φ_c, Φ_z, Φ_x – матрицы формы рабочих органов станка, совершающих перемещения по осям X, Y, Z ;

$R_z(\tau)$ – матрица преобразования, задающая вращение вокруг оси z ;

$T_x(\tau), T_z(\tau)$ – матрицы преобразования, задающие поступательные перемещения вдоль осей x, z .

Модель инструмента, в соответствии с принятыми выше правилами, строится в своей ССК, направление осей которой отличаются от направления осей системы координат станка. Поэтому в уравнении (3) требуется осуществить геометрическое преобразование, позволяющее расположить режущую кромку относительно заготовки корректным образом. Такое преобразование производится матрицей формы инструмента, полученной в результате анализа взаимного расположения ССК инструмента и заготовки. Данная матрица рассчитывается как результат произведения матриц параллельного переноса координатной системы лезвия ин-

струмента, поворота на 90° вокруг оси y и поворота в отрицательном направлении на 90° вокруг оси z :

$$\Phi_{\text{и}} = R_z\left(-\frac{\pi}{2}\right)R_y\left(\frac{\pi}{2}\right)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & x_p \\ 0 & 0 & -1 & y_p \\ -1 & 0 & 0 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где x_p, y_p, z_p – смещение точки начала координат ССК инструмента относительно нулевой точки инструмента;

R_y – матрица преобразования, задающая вращение вокруг оси y .

Математическая модель заготовки задана образующей линией, записываемой аналогично уравнению (1) с последующим преобразованием поворота:

$$W(u, w, j) = W_j(u - j, w), u \in (0, \dots, U), w \in (-\pi, \pi),$$

где u – параметр образующей поверхности вращения заготовки;

U – число сегментов образующей заготовки, w – параметр направляющей, задающий угол расположения точки поверхности;

j – номер сегмента кривой образующей поверхности инструмента.

Для расчета пересечений задается уравнение нормалей:

$$W_n(u, w) = W_{nj}(u - j, w), u \in (0, \dots, U), w \in (-\pi, \pi).$$

На поверхности заготовки формируется след от инструмента, нормали к поверхности которого приближенно задаются уравнением:

$$R_n(t, \tau) = M_c(\tau)\Phi_{\text{и}}K_n(t, i),$$

где $K_n(t, i)$ – нормаль к режущей кромке, параллельная основной плоскости инструмента.

Для построения модели геометрического образа обработанной поверхности требуется отсечь выступающие края поверхности резания за пределами линий ее самопересечения и пересечения с поверхностями заготовки. Был разработан специальный алгоритм отсечения.

Для сокращения вычислительных затрат следует исключить моделирование поведения системы на холостом ходу до врезания инструмента в заготовку. Моделирование обработки необходимо запускать после касания заготовки режущей кромкой инструмента. Для определения момента врезания рассмотрим два случая (рисунок 2).

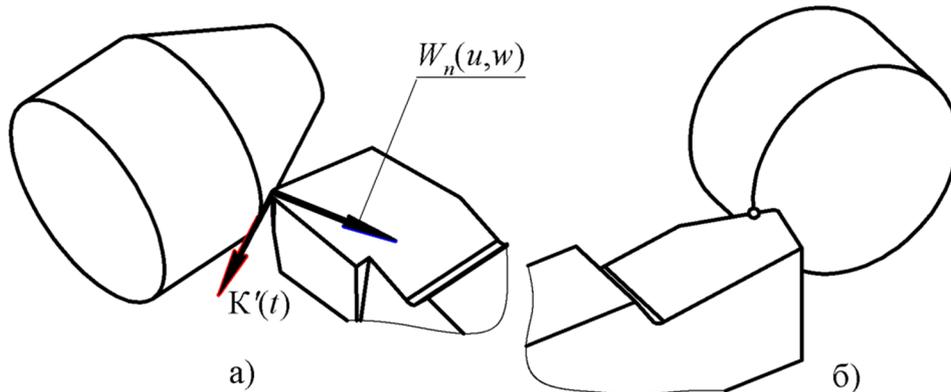


Рисунок 2 – Врезание реза в заготовку:

а) – касание режущей кромкой поверхности заготовки; б) – пересечение режущей кромкой ребра заготовки

В первом случае происходит касание выпуклой режущей кромкой поверхности заготовки (рисунок 2, а). При этом выполняются условия совпадения координат точек поверхности резания, а также ортогональности нормали к поверхности заготовки и касательной к режущей кромке:

$$\begin{cases} [W(u, w)]_{3 \times 1} = [R(t, \tau)]_{3 \times 1} \\ [W_n(u, w)]_{3 \times 1} \cdot [M_c(\tau)V(\tau)\Phi_{\text{и}}K'(t)]_{3 \times 1} = 0 \end{cases}$$

Во втором случае (рисунок 2, б) режущая кромка пересекает ребро заготовки. Если заготовка имеет ступенчатую форму и имеет несколько ребер, требуется провести вычисления для каждого ребра, задав, например, условия равенства координат точек режущей кромки и ребра заготовки, а также наличие единственности точки пересечения кривых.

Для уменьшения объема вычислительной программы точку врезания инструмента в заготовку целесообразно искать с использованием минимизации функции, производящей расчет времени:

$$\begin{cases} [W(u, w)]_{3 \times 1} - [R(t, \tau)]_{3 \times 1} = 0 \\ \tau \rightarrow \min \end{cases}$$

Поверхность резания задается образующей линией – режущей кромкой и направляющей, представляющей собой траекторию перемещения инструмента относительно заготовки. Построение поверхности резания при моделировании точения профильной поверхности по уравнению (3) с учетом колебаний показано на рисунке 3.

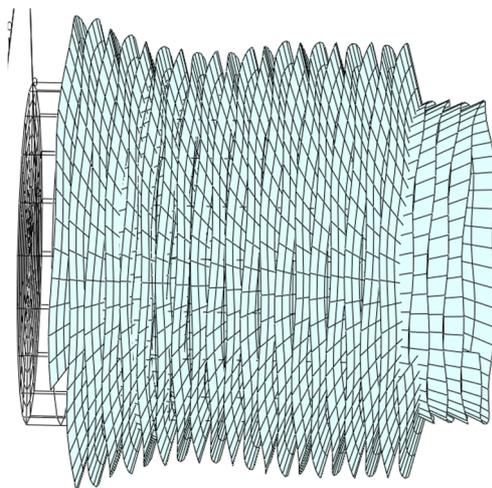


Рисунок 3 – Поверхность резания при точении заготовки с криволинейной образующей

Для построения модели геометрического образа обработанной поверхности требуется отсечь выступающие края поверхности резания за пределами линий ее самопересечения и поверхностями заготовки. Поскольку таких точек несколько, был разработан специальный алгоритм отсечения, основанный на поиске точек пересечения и последующем анализе направлений касательных к образующей поверхности резания и нормалей к анализируемым поверхностям.

При моделировании сформированной в процессе токарной обработки поверхности для рассматриваемого положения режущей кромки необходимо рассчитывать пересечения поверхностей в четырех точках (рисунок 4). Точки, соответствующие параметрам t_0 и t_3 лежат на пересечении режущей кромки и поверхности заготовки. Точка t_2 лежит на пересечении линии режущей кромки в рассматриваемом положении со следом от инструмента, сформированном на предыдущем обороте заготовки. Заметим, что пересечение поверхности резания в точке t_2 на линии режущей кромки появляется только после полного врезания инструмента в заготовку. Пересечение поверхностей резания в точке t_1 образуется на втором обороте заготовки. Точки t_0 и t_3 отыскиваются при решении численным методом системы уравнений для заданного положения режущей кромки и значения системного времени τ :

$$[W(u, w)]_{3 \times 1} - [R(t, \tau)]_{3 \times 1} = 0 .$$

Точки t_1 и t_2 вычисляются за два цикла изменения системного времени. На первом цикле производится моделирование обработки, при котором рассчитывается точка t_2 при решении уравнения:

$$[M_c(\tau)\Phi_{и}K'(t_2)]_{3 \times 1} - [M_c(\tau_b)\Phi_{и}K'(t_{b1})]_{3 \times 1} = 0 , \quad (3)$$

где τ_b – системное время, определяющее положение режущей кромки на предыдущем обороте заготовки;

t_{b1} – параметр, задающий положение точки пересечения с поверхностью резания на предыдущем обороте заготовки.

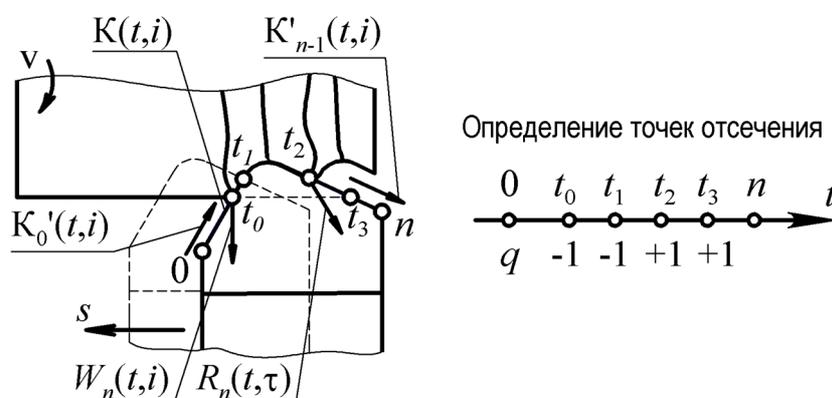


Рисунок 4 – Схема определения точек отсечения

Известные модели образования шероховатости используют для построения профиля гребешка проекцию режущей кромки на основную плоскость. Поскольку предлагаемая модель учитывает влияние углов γ и λ , а также колебания инструмента в направлении скорости главного движения, соседние образующие поверхности резания, рассчитанные по положениям режущей кромки инструмента в заданные моменты системного времени, в пространстве не находятся в одной плоскости. Поэтому концы соседних образующих линий на вершинах модели геометрического образа гребешка шероховатости между собой не совпадают. Расчет по уравнению (3) дает возможность определять только точку t_2 на образующей, соответствующей времени τ , поэтому для соседнего следа для определения t_1 требуется производить другой расчет.

Для определения t_1 после моделирования процесса обработки производится повторный цикл расчета, использующий данные, полученные в цикле моделирования. При этом по рассчитанной ранее траектории инструмента на последующем обороте производится вычисление параметра t_1 при решении уравнения:

$$[M_c(\tau)\Phi_{и}K'(t_1)]_{3 \times 1} - [M_c(\tau_a)\Phi_{и}K'(t_{a2})]_{3 \times 1} = 0,$$

где τ_a – системное время, определяющее положение режущей кромки на последующем обороте заготовки;

t_{a2} – параметр, соответствующий положению точки пересечения с образующей поверхности резания на последующем обороте заготовки.

После определения координат точек пересечения необходимо решить вопрос о том, какой участок образующей линии режущей кромки будет оставлен на обработанной поверхности. Используется следующий алгоритм отсечения. В найденных точках пересечения $t_0 - t_3$ рассчитываются касательные векторы к режущей кромке, а также нормали к поверхности заготовки или поверхности резания. При этом направления векторов нормали выбираются на внешнюю сторону заготовки, нормали к поверхности резания – в тело инструмента. Для каждой точки находятся скалярные произведения нормированных касательных векторов $\|\bar{K}_n(t, \tau)\|_{3 \times 1}$ и нормалей к поверхности заготовки $\|\bar{W}_n(u, w)\|_{3 \times 1}$, либо $\|\bar{R}_n(t, \tau)\|_{3 \times 1}$. Скалярное произведение векторов определяет косинус угла между ними. Нулевое значение данного произведения означает касательность режущей кромки и поверхности. Положительные и отрицательные значения произведения определяют признаки пересечения для «входа» и «выхода» режущей кромки:

$$q = \begin{bmatrix} \operatorname{sgn} \left(\left\| \bar{K}_n(t_0, \tau) \right\|_{3 \times 1} \cdot \left\| \bar{W}_n(u, w) \right\|_{3 \times 1} \right) \\ \operatorname{sgn} \left(\left\| \bar{K}_n(t_1, \tau) \right\|_{3 \times 1} \cdot \left\| \bar{R}_n(t, \tau_r) \right\|_{3 \times 1} \right) \\ \operatorname{sgn} \left(\left\| \bar{K}_n(t_2, \tau) \right\|_{3 \times 1} \cdot \left\| \bar{R}_n(t, \tau_r) \right\|_{3 \times 1} \right) \\ \operatorname{sgn} \left(\left\| \bar{K}_n(t_3, \tau) \right\|_{3 \times 1} \cdot \left\| \bar{W}_n(u, w) \right\|_{3 \times 1} \right) \end{bmatrix}.$$

Значения векторов параметра t и признаков пересечения q объединяются в таблицу:

$$T_{tq} = [t \quad q].$$

Производится сортировка строк таблицы по возрастанию значения параметра t , расположенного в первом столбце:

$$T_{tq}^s = \operatorname{sort}(T_{tq}, 1).$$

Последовательное расположение строк, имеющих одинаковые знаки признаков пересечения, определяет последовательное снятие слоев материала с поверхности заготовки. Отсечение производится при выполнении следующих условий. Полностью будут удалены образующие, соответствующие строкам таблицы для которых выполняется условие:

$$t_1 \geq t_i.$$

Отсекаться будут кривые, расположенные за пределами отрезков, ограниченных точками, в которых признак пересечения q меняет знак.

В качестве примера рассмотрим работу алгоритма на участке врезания резца в заготовку (рисунок 5).

Первоначально при врезании инструмента в заготовку (рисунок 5, а) точка t_1 может оказаться имеющей наибольшее значение параметра t . Поэтому данная образующая при построении модели шероховатой поверхности будет удалена на следующем обороте. Однако, если необходимо будет моделировать след инструмента на первом рабочем обороте заготовки, когда точка t_1 еще не существует, то образующей обработанной поверхности будет отрезок кривой между точками t_0 и t_3 . При дальнейшем врезании будет уменьшаться значение параметра в точке t_1 и отсечение отрезка образующей будет производиться в точках t_1 и t_3 . (рисунок 5, б).

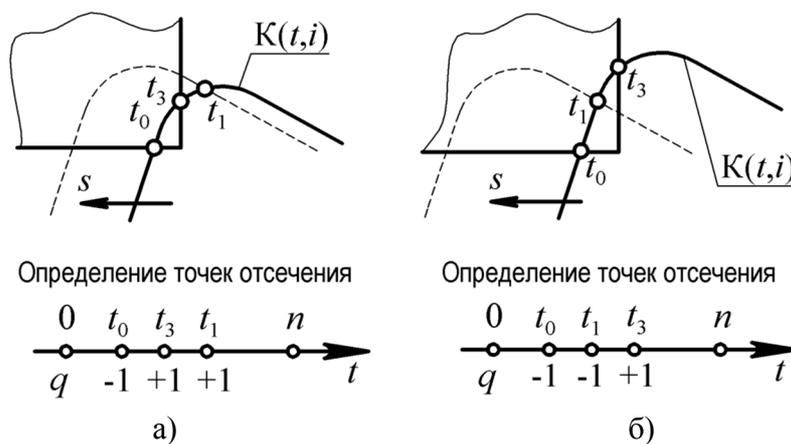


Рисунок 5 – Точки отсечения при моделировании врезания в заготовку

Модель геометрического образа обработанной заготовки, построенная по предложенному алгоритму, показана на рисунке 6.

Моделирование пластической деформации вершин гребешков шероховатости может быть произведено при проведении матричного преобразования, деформирующего образующую поверхности резания, задающую сторону гребешка шероховатости, сформированную на предыдущем обороте.

Основная трудность в реализации алгоритмов заключается в поиске точек пересечения режущей кромки с поверхностью заготовки и поверхностью резания. Это объясняется наличием нескольких точек пересечения режущей кромки с поверхностью заготовки и по-

верхностью резания. При их близком расположении может быть найдена одна и та же точка, что приводит к необходимости тщательного задания начальных значений.

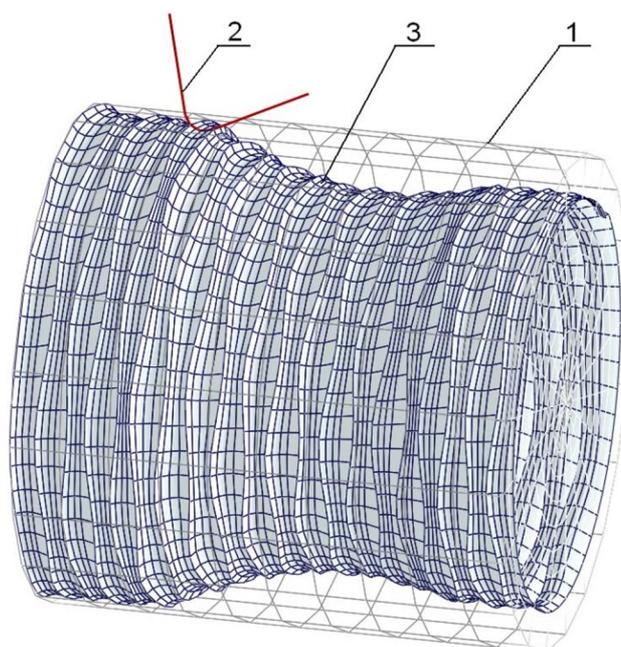


Рисунок 6 – Визуализация модели геометрического образа обработанной поверхности заготовки:
 1 – каркасное представление поверхности заготовки;
 2 – отображение положения режущей кромки при обработке; 3 – обработанная поверхность

В настоящее время для нахождения точек пересечения поверхностей используется алгоритм Ньютона–Рафсона, способный за один цикл вычислений находить только одну точку в заданной области. При близком расположении точек пересечения, например, при врезании инструмента в заготовку при поиске может быть найдена одна и та же точка, что приводит к необходимости тщательного задания начальных значений. Это ограничивает возможности алгоритма и затрудняет его практическое использование. Для практической реализации предложенного метода необходима разработка алгоритма, позволяющего отыскивать множества точек пересечения линии и поверхности. Такой возможностью, например, обладает метод продолжения решения по параметру.

Предложенный алгоритм построения модели геометрического образа микрогеометрии поверхности заготовки может использоваться при моделировании процесса точения поверхностей вращения с криволинейной образующей с учетом сложного движения инструмента за счет вибраций в упругой технологической системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерия поверхности деталей/ Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Михрютин, В.В. Методология построения комплексной системно–аналитической модели процессов резания / В.В. Михрютин // Вестник РГТА имени П.А. Соловьева, – Рыбинск: РГТА. – 2010. – № 1(16). – С. 39 – 46.
3. Козлов, В.А. Аналитическое определение параметров сечения среза и угла схода стружки при лезвийной обработке материалов: Учебное пособие / В.А. Козлов. РГТА. Рыбинск, 1990. – 209 с.
4. Петрушин, С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. Учебное пособие / С.И. Петрушин. Томск: Изд. ТГУ, 2004. – 172 с.
5. Михрютин, В.В. Моделирование профиля рабочих кромок режущего инструмента / В.В. Михрютин, А.А. Коряжкин // Международный форум технологов–машиностроителей, посвященный 90–летию профессора Маталина А.А.: Сб. научн. тр. – СПб.: Изд. «Инструменты и технологии». СПб. – 2004. – С. 146 – 148.
6. Михрютин, В.В. Расчет параметров сечения среза при моделировании процесса точения / В.В. Михрютин, А.А. Коряжкин // Международный форум технологов–машиностроителей, посвященный 90–летию профессора Маталина А.А.: Сб. научн. тр. – СПб.: Изд. «Инструменты и технологии». СПб. – 2004. – С. 148 – 151.
7. Михрютин, В.В. Разработка модели геометрического образа режущего инструмента / В.В. Михрютин // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 1. – С. 31 – 34.

8. Михрютин, В.В. Построение математических моделей рабочих кромок лезвий режущих инструментов / В.В. Михрютин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. – 2010. – № 3(18). – С. 158 – 166.

9. Михрютин, В.В. Методика решения прямой задачи о положениях инструмента и рабочих органов технологического оборудования в пространстве/ В.В. Михрютин // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 4. – С. 33 – 40.

10. Михрютин, В.В. Модель формирования шероховатости при точении поверхностей с криволинейной образующей / В.В. Михрютин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XI-ой Международной научно-практической конференции (19–21 марта 2014 года) в 4-х томах, Том 3, Юго-Зап. Гос. Ун-т., Курск. – 2014. – С. 95 – 100.

Михрютин Вадим Владимирович

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева.

г. Рыбинск

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты имени С.С. Силина»

E-mail: v_mihrutin@rgata.ru

V.V. MIHRYUTIN

DEVELOPMENT MODELS GEOMETRIC IMAGES ROUGH SURFACE TURNING PARTS WITH A CURVILINEAR GENERATRIX

This article describe a new algorithm for creation geometric model of parts machined surface. Model taken into account mechanical system vibrations.

Keywords: *machining, cutting process simulation, machined surface geometric image, surface roughness modeling.*

BIBLIOGRAPHY

1. Inzheneriya poverkhnosti detaley/ Koll. avt.; pod. red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroyeniye, 2008. – 320 s.
2. Mikhryutin, V.V. Metodologiya postroyeniya kompleksnoy sistemno-analiticheskoy modeli protsessov rezaniya / V.V. Mikhryutin // Vestnik RGATA imeni P.A. Solovyeva, – Rybinsk: RGATA. – 2010. – № 1(16). – S. 39 – 46.
3. Kozlov, V.A. Analiticheskoye opredeleniye parametrov secheniya sreza i ugla skhoda struzhki pri lezviy noy obrabotke materialov: Uchebnoye posobiye / V.A. Kozlov. RGATA. Rybinsk, 1990. – 209 s.
4. Petrushin, S.I. Osnovy formoobrazovaniya rezaniyem lezviynymi instrumentami. Uchebnoye posobiye / S.I. Petrushin. Tomsk: Izd. TGU, 2004. – 172 c.
5. Mikhryutin, V.V. Modelirovaniye profilya rabochikh kromok rezhushchego instrumenta / V.V. Mikhryutin, A.A. Koryazhkin // Mezhdunarodnyy forum tekhnologov–mashinostroyteley, posvyashchenny 90–letiyu professora Matalina A.A.: Sb. nauchn. tr. – SPb.: Izd. «Instrumenty i tekhnologii». SPb. – 2004. – S. 146 – 148.
6. Mikhryutin, V.V. Raschet parametrov secheniya sreza pri modelirovanii protsessa tocheniya / V.V. Mikhryutin, A.A. Koryazhkin // Mezhdunarodnyy forum tekhnologov–mashinostroyteley, posvyashchenny 90–letiyu professora Matalina A.A.: Sb. nauchn. tr. – SPb.: Izd. «Instrumenty i tekhnologii». SPb. – 2004. – S. 148 – 151.
7. Mikhryutin, V.V. Razrabotka modeli geometricheskogo obraza rezhushchego instrumenta / V.V. Mikhryutin // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2006. – № 1. – S. 31 – 34.
8. Mikhryutin, V.V. Postroyeniye matematicheskikh modeley rabochikh kromok lezviy rezhushchikh instrumentov / V.V. Mikhryutin // Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Solovyeva. – 2010. – № 3(18). – S. 158 – 166.
9. Mikhryutin, V.V. Metodika resheniya pryamoy zadachi o polozheniyakh instrumenta i rabochikh organov tekhnologicheskogo oborudovaniya v prostranstve/ V.V. Mikhryutin // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2009. – № 4. – С. 33 – 40.
10. Mikhryutin, V.V. Model formirovaniya sherokhovatosti pri tochenii poverkhnostey s krivoli–neynoy obrazuyushchey / V.V. Mikhryutin // Sovremennyye instrumentalnyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XI–oy Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii (19–21 marta 2014 goda) v 4–kh tomakh, Tom 3, Yugo–Zap. Gos. Un–t., Kursk. – 2014. – S. 95 – 100.

Mikhryutin Vadim Vladimirovich

Rybinsk State Aviation

Technical University named after P.A. Solovyov.

Rybinsk

Ph.D., Associate Professor of «Cutting of materials, machine tools

Tools behalf S.S. Silin»

E-mail: v_mihrutin@rgata.ru

Г.Х. ИРЗАЕВ

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ИЗДЕЛИИ НА ЭТАПАХ ОСВОЕНИЯ И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Приведены результаты исследований влияния уровня технологичности на возникновение требований о конструкторско–технологических изменениях в изделии. Построена модель прогнозирования изменений в изделии, основанная на функциональной зависимости количества изменений от уровня разногласий между конструкторами и технологами при оценке качественных факторов технологичности. Модель позволяет заблаговременно выделить дополнительные мощности инструментальной базы изготовителя для обеспечения технологической подготовки проводимых изменений.

Ключевые слова: технологичность конструкции, конструкторско–технологическое изменение, прогноз, уровень разногласий экспертов, классификатор, качественный фактор.

Современное приборостроение нуждается в снижении ресурсоемкости выпускаемых изделий. В условиях чрезвычайно острой конкуренции возрастает значение высокотехнологичных конструкций и инженерных решений в изделиях, интегрирующих в себе концепцию дальнейшего развития. Эффективная отработка изделия на технологичность становится ключом для достижения и поддержания конкурентных преимуществ предприятия за счет повышения качества, функциональности, экономичности продукции, использования внутренних резервов и возможностей проектно–производственной среды.

Уровень технологичности во многом зависит от качества проектных решений и конструкторской документации (КД). Низкое качество конструкторских решений приводит к необходимости внесения изменений в конструкцию и технологию изготовления, доработке КД на более поздних этапах жизненного цикла изделия. Если изменения вносятся по результатам конструкторско–технологической отработки изделия, производство особых затруднений не испытывает, так как подразделения предприятия получают документальное подтверждение того, что уже сделано. Если же необходимость изменений возникла при освоении и изготовлении партии изделий, то это влечет переделку выполненной работы, списание заменяемой элементной базы, деталей, узлов, заделов, необходимость повторных отработок и расчетов. Возникает необходимость в пересмотре технологических процессов изготовления, изменении конструкции технологической оснастки, что, в конечном итоге, повышает затраты и снижает технологичность изделия.

Наблюдения в реальном производстве показывают, что специалисты считают отработку технологичности конструкции (ТК) изделия на первой партии выпуска практически неосуществимой задачей, а изменения допускаются даже во второй и третий годы серийного производства сложных изделий.

Если вопросы обеспечения ТК изделий на этапах проектирования методологически проработаны, то проблемы снижения затрат за счет прогнозирования и оптимизации потоков изменений в конструкции и технологии изготовления изделий в публикациях практически не затрагиваются. Как показывает практика освоения и серийного производства изделий приборостроения, оформление, обработка, сопровождение и реализация таких изменений требует не только трудозатрат специалистов различного профиля предприятия–изготовителя (в среднем 20...30% от общего рабочего времени), но нередко значительных затрат на технологическую подготовку таких изменений [1, 2]. В последнее время предлагаются решения по автоматизированному учету, оформлению и проведению конструкторско–технологических изменений в составе САПР или в виде отдельных программных комплексов [3–6]. Однако автоматизация процессов обслуживания изменений, ускоряя и облегчая

специалистам процедуры их оформления, учета и согласования, в то же время не влияет на количество и трудоемкость самих изменений, не снимают проблему планирования и снижения материальных и трудовых затрат при технологической подготовке изменений в конструкциях.

Предприятия сталкиваются с проблемой перестройки налаженного производства из-за необходимости внесения изменений в конструкцию осваиваемых изделий и непредвиденных дополнительных затрат основного и вспомогательного производства на проведение и реализацию этих изменений. Целью данного исследования является разработка модели прогнозирования объемов и структуры конструкторско-технологических изменений в изделии на этапе его освоения и серийного производства. Полученный прогноз позволит запланировать необходимые дополнительные производственные мощности, организовать эффективное, гибкое управление работами по реализации конструкторско-технологических изменений.

Анализ влияния уровня технологичности на возникновение требований о конструкторско-технологических изменениях в изделии. Исследования, проведенные на нескольких предприятиях отрасли, показали, что информационный поток извещений, являющихся документальным подтверждением проводимых конструкторско-технологических изменений, формируется под влиянием различных факторов и имеет различную мощность в зависимости от этапа жизненного цикла конструкции. Согласно результатам исследований, приводимым в [7], в период освоения в изделие вносится более 40% изменений, на втором году серийного выпуска – более 30% от общего числа изменений.

Анализ, проведенный в публикациях [8–10], объясняет появление извещений такими причинами как недостаточный учет разработчиком специфических производственно-технологических условий предприятия-изготовителя, необходимость внедрения высокотехнологичных, инновационных решений, повышение качества, надежности, безопасности, экологичности изделия. Однако основанием для возникновения требований на изменения нередко служат и низкое качество конструкторско-технологических решений, и ошибки, допущенные в КД разработчиком. Таким образом, появление извещений вызвано в основном факторами, связанными с чрезмерно затратными, нетехнологичными решениями в конструкциях изделий приборостроения [7, 11–13].

Можно выдвинуть гипотезу о том, что чем ниже уровень технологичности изделия, оцененный на последних этапах его проектирования, тем выше вероятность появления извещений об изменениях в конструкции и технологии изделия на этапах его освоения и серийного выпуска. Для подтверждения гипотезы разработаны классификаторы причин появления извещений и факторов ТК с целью подтверждения наличия обратной функциональной связи между ними.

Возникновение требования на выпуск извещения об изменениях в конструкции или технологии, как доказано в [7], является случайным событием. Совокупность случайных событий формирует поток требований, который несет в себе массив информации, обрабатываемый исполнителями. Важными характеристиками потока являются его объем на отрезке времени наблюдения и закон распределения требований. Кроме того, данный поток информации обладает сложной структурой, которая обусловлена содержательной стороной требований. Следовательно, для лучшего изучения и оценки характеристик потока необходимо рациональным образом классифицировать его составляющие путем их объединения в группы требований по логическому признаку.

Существующие стандарты [14–16] регламентируют порядок внесения изменений в КД и предлагают достаточно обширный классификатор причин и шифров изменений. Анализ классификатора показал, что в отдельных случаях рекомендуемые шифры дополняют и «перекрывают» друг друга, носят неконкретный, заглавный характер, что затрудняет изучение структуры и содержания изменений, вносимых в конструкцию.

С целью обеспечения эффективности экспериментальных исследований системы по обработке извещений, был разработан новый классификатор причин и шифров изменений, группирующий их более четко и конкретно (таблица 1).

Таблица 1 – Классификатор причин и шифров изменений, вносимых в КД.

| п/п | Шифр по ОСТ | Причина изменения | Присвоенный шифр |
|-----|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 1 | 1 | Замена материалов | П01 |
| 2 | 1 | Улучшение условий эксплуатации | П02 |
| 3 | 1 | Улучшение механических характеристик и прочности конструкции | П03 |
| 4 | 1 | Улучшение климатических характеристик | П04 |
| 5 | 4.3 | Замена элементов, комплектующих | П05 |
| 6 | 1.1 | Улучшение электрических характеристик | П06 |
| 7 | 1.1 | Введение схемных улучшений и усовершенствований | П07 |
| 8 | 1.1 | Сокращение количества регулируемых элементов и контролируемых параметров | П08 |
| 9 | 1.1 | Улучшение качества настройки и регулировки изделия | П09 |
| 10 | 1 | Снижение трудоемкости обработки за счет изменения класса точности и шероховатости | П10 |
| 11 | 2 | Снижение трудоемкости сборки | П11 |
| 12 | 2 | Снижение трудоемкости монтажа | П12 |
| 13 | 3 | Стандартизация, унификации составных частей изделия | П13 |
| 14 | 2 | Внедрение более производительного оснащения | П14 |
| 15 | 2 | Выбор более производительного оснащения | П15 |
| 16 | 1, 7.3 | Выбор более простых и совершенных конструктивных решений | П16 |
| 17 | 7.1, 7.3 | Устранение графических и текстовых ошибок, опечаток в КД | П17 |
| 18 | 2 | Снижение трудоемкости изготовления за счет более простых форм деталей и правильного раскроя заготовок | П18 |
| 19 | 1.1 | Повышение помехозащищенности и чувствительности изделий | П19 |
| 20 | 2 | Создание новых технологических баз и приведение размеров к принятым рядам | П20 |

Структурировать процессы управления технологичностью изделия и качественной оценки этого свойства позволяют предварительно выделенные в виде исходного множества, а затем оптимизированные по составу качественные факторы, всесторонне характеризующие ТК изделий приборостроения. Формирование качественных факторов ТК осуществлялось по критерию их информативности экспертами с разными уровнями и областями знаний – конструкторами, технологами, схемотехниками, экономистами, материаловедцами. Состав факторов был ориентирован на типовые конструкции разрабатываемых приборостроительным предприятием классов изделий и его производственно–технологическую базу. Алгоритм формирования множества качественных факторов ТК подробнее изложен в [17]. Сформированный список качественных функционально–конструкторских, технологических и организационно–технических факторов ТК представлен в таблице 2.

Соответствие между причинами изменений и факторами технологичности устанавливалось в ходе опроса экспертов, в качестве которых выступали высококвалифицированные специалисты, использовавшие информацию, подтвержденную множеством свидетельских и опытных данных. Из предложенных экспертами пар «фактор – причина» были выбраны те, на которые указала большая часть опрашиваемых.

Оценка ТК проводилась по разработанному ранее методу экспертной оценки на базе учета и минимизации разногласий специалистов двух профессиональных групп – конструкторов–разработчиков и технологов–изготовителей объекта экспертизы [18]. В качестве управляющей информации при этом рассматривался уровень разногласий этих специалистов по тем или иным параметрам комплексной оценки ТК, в качестве которых выступали факторы из таблицы 2.

Использование принципа учета разногласий экспертов можно обосновать следующими соображениями. Понятие технологичности, охватывая широкий круг конструкторско-технологических вопросов, несет в себе определенные противоречия, которые базируются на имеющемся объективном различии точек зрения конструктора-разработчика и технолога-изготовителя в оценке ТК. Конструктор при проектировании стремится обеспечить, прежде всего, заданные тактико-технические характеристики изделия и не всегда имеет возможность глубоко анализировать степень технологического совершенства создаваемой конструкции, трудоёмкость изготовления различными методами. Технолог, в свою очередь, заинтересован получить от разработчика простое в изготовлении изделие, иногда даже за счет снижения его отдельных функциональных характеристик. Конструктор может считать созданную им конструкцию достаточно технологичной, в то время как технолог, основываясь на оценке технологического уровня своего предприятия, требует изменения конструкции с целью обеспечения высокоэффективного и экономичного производства. Основой разрешения этих противоречий является согласование тех изменений в конструкции, которые обеспечат достижение компромиссного уровня ее технологичности, приемлемого для изготовления при безусловном обеспечении эксплуатационных характеристик изделия.

Таблица 2 – Качественные факторы технологичности конструкции.

| Обозначение фактора | Наименование фактора |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ф01 | Элементная база изделия |
| Ф02 | Примененные схемные решения |
| Ф03 | Простота настройки и регулировки |
| Ф04 | Элементы несущих конструкций |
| Ф05 | Конструкция деталей из металла |
| Ф06 | Конструкция деталей из диэлектрика |
| Ф07 | Конструкция экранов |
| Ф08 | Допуски на геометрические размеры и шероховатость поверхности деталей и сборочных единиц |
| Ф09 | Допуски на электрические параметры функциональных узлов и блоков изделия |
| Ф10 | Материал деталей из металла |
| Ф11 | Приспособленность конструкции к сборке и монтажу |
| Ф12 | Вид защитно-декоративных покрытий |
| Ф13 | Унифицированные детали, сборочные единицы, функциональные узлы изготовителя |
| Ф14 | Имеющиеся у изготовителя оборудование, оснастка, КИА, стенды |
| Ф15 | Качество конструкторской документации |
| Ф16 | Степень типизации техпроцессов у изготовителя |
| Ф17 | Квалификация рабочих механообрабатывающего производства |
| Ф18 | Квалификация рабочих сборочно-монтажного производства |
| Ф19 | Квалификация регулировщиков |
| Ф20 | Уровень автоматизации производства изготовителя |

Эксперты в автоматизированном режиме упорядочивали качественные факторы по интенсивности их влияния на ТК разрабатываемого изделия с использованием парных сравнений. Полученные индивидуальные оценки экспертов проверялись на согласованность с помощью дисперсионного коэффициента конкордации W , строились обобщенные ранжирования по обеим группам экспертов по методу Хемминговой метрики и было получено результирующее ранжирование как медиана Кемени. Результатом экспертизы стал коэффициент технологичности изделия K_T , а также уровень пофакторных разногласий между экспертами-конструкторами и экспертами-технологами y_i . Очевидно, что чем больше уровень разногласий между группами экспертов в оценке влияния на технологичность изделия какого-либо фактора, тем больший вклад вносит этот фактор в ухудшение технологичности конструкции, а это повлечет за собой позднее, на этапах освоения и серийного производства, по-

явление потока требований на изменения конструкции и технологии изделия по соответствующей причине.

Модель прогнозирования изменений в изделии на этапах освоения и серийного выпуска. Модель разрабатывалась на базе экспериментальных данных. Эксперименты проводились на типичном по серийности продукции и техническому уровню предприятии отрасли, выпускающем измерительные приборы широкой номенклатуры (25 типов) при серийности выпуска от 20 до 4000 изделий в год. В качестве объектов исследования были выбраны 5 контрольных изделий приборостроения – осциллографы, генераторы коротких сигналов, измерители, условно обозначенные как ГК1, ГИ1, ГИ2, ГВ1, ГВ2. Время наблюдения охватывало период проектирования, освоения и три года серийного выпуска для каждого изделия.

На последней стадии проектирования в ходе экспертных оценок ТК изделий были определены значения коэффициента технологичности и пофакторные уровни разногласий экспертов y_i .

Для статистического анализа структуры потока извещений на этапах освоения и серийного выпуска изделий была разработана специальная электронная карта (рисунок 1), которая через программу управления изменениями в системе электронного документооборота предприятия привязывалась к каждому извещению и следовала по заданному маршруту согласования через исполнителей, которые фиксировали время основных событий по внесению изменения в изделие. К опросной электронной карте прилагался также классификатор причин и сложности изменений, в соответствии с которым заносились шифр и краткое содержание изменения.

| | | | | | |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----|
| Изделие | БС | Год выпуска | 2011 | № изменения | 148 |
| Причина изменения | П01 | | Группа сложности | 2 | |
| Краткое содержание изменения | Замена материала деталей из металла марки БрБ2Г на марку БрБ2М | | | | |
| Дата начала оформления извещения | 21.03.2012 | | Дата подписи нормоконтролером | 11.05.2012 | |
| Дата внесения изменений во все экземпляры КД | 19.07.2012 | | Изменения в технологии и оснастке | нет | |

Рисунок 1 – Пример заполненной электронной карты обследования входящего потока требований на конструкторско-технологические изменения

Общее количество извещений разбивалось по причинам появления и определялась вероятность появления извещения p_{ij} по i -й причине для j -го изделия одного класса согласно формуле:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{i=1}^{20} n_j},$$

где $\sum_{i=1}^{20} n_j$ – общее число извещений, выпущенных за период наблюдения на изменения в

j -м изделии по всем причинам;

n_{ij} – число извещений, выпущенных за период наблюдения на изменения в j -м изделии по i -й причине.

Причины появления извещений на изменения в изделиях ранжировались по значениям полученных вероятностей, причем, чем выше было значение p_{ij} , тем более высокий ранг ему присваивался. Теснота связи между уровнем пофакторных разногласий в группах экспертов и вероятностью появления извещений на изменения в изделии по i -й причине рассчитывалась с помощью коэффициента Спирмэна по формуле:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m d^2}{m(m^2 - 1)},$$

где m – число факторов (причин);

d – абсолютная величина разности рангов уровня разногласий экспертов по i -му фактору (r_i^Y) и рангов вероятности изменения по соответствующей этому фактору причине (r_i^P): $d_i = |r_i^Y - r_i^P|$.

Результаты ранжирований и расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета тесноты связи между ранжированиями.

| Шифр факторов технологичности, Φ_i | Ранжирование уровня разногласий экспертов, r_j , в оценках технологичности изделий | | | | | Шифр соответствующей фактору причины изменений, Π_i | Ранжирование вероятностей появления изменений, r_p , в изделиях | | | | |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | ГИ1 | ГИ2 | ГВ1 | ГВ2 | ГК1 | | ГИ1 | ГИ2 | ГВ1 | ГВ2 | ГК1 |
| Ф01 | 6,5 | 5 | 5 | 1 | 16 | П05 | 5 | 5 | 5,5 | 2 | 18,5 |
| Ф02 | 6,5 | 6 | 5 | 14 | 18,5 | П07 | 4 | 6 | 4 | 12,5 | 18,5 |
| Ф03 | 2,5 | 7,5 | 7 | 12 | 6 | П09 | 3 | 9 | 5,5 | 9,5 | 6 |
| Ф04 | 2,5 | 3 | 18,5 | 18,5 | 8 | П16 | 2 | 3 | 18,5 | 17,5 | 8 |
| Ф05 | 18,5 | 4 | 15 | 16 | 5 | П03 | 18,5 | 4 | 14 | 17,5 | 5 |
| Ф06 | 14 | 18,5 | 16 | 12 | 9 | П02 | 14 | 18,5 | 18,5 | 12,5 | 9 |
| Ф07 | 15,5 | 9 | 9 | 5 | 11 | П19 | 18,5 | 10 | 7,5 | 5 | 14 |
| Ф08 | 18,5 | 18,5 | 13,5 | 9 | 18,5 | П10 | 18,5 | 17,5 | 14 | 17,5 | 15,5 |
| Ф09 | 1 | 2 | 13,5 | 18,5 | 2 | П06 | 1 | 2 | 10,5 | 17,5 | 2 |
| Ф10 | 6,5 | 1 | 18,5 | 12 | 7 | П01 | 7 | 1 | 14 | 12,5 | 7 |
| Ф11 | 13 | 15 | 2 | 18,5 | 1 | П11 | 14 | 14,5 | 1,5 | 17,5 | 1 |
| Ф12 | 12 | 18,5 | 10 | 7,5 | 10 | П04 | 11,5 | 14,5 | 14 | 7 | 10 |
| Ф13 | 18,5 | 16 | 5 | 18,5 | 3 | П13 | 18,5 | 18,5 | 7,5 | 17,5 | 4 |
| Ф14 | 11 | 10 | 11,5 | 2 | 4 | П15 | 10 | 7,5 | 10,5 | 1 | 3 |
| Ф15 | 10 | 11 | 1 | 3 | 13 | П17 | 11,5 | 14,5 | 1,5 | 3 | 11,5 |
| Ф16 | 4 | 7,5 | 8 | 10 | 18,5 | П20 | 8,5 | 7,5 | 9 | 9,5 | 18,5 |
| Ф17 | 15,5 | 14 | 18,5 | 6 | 13 | П18 | 14 | 14,5 | 18,5 | 7 | 11,5 |
| Ф18 | 9 | 13 | 3 | 4 | 13 | П12 | 6 | 12 | 3 | 4 | 13 |
| Ф19 | 6,5 | 12 | 11,5 | 15 | 18,5 | П08 | 8,5 | 11 | 14 | 12,5 | 18,5 |
| Ф20 | 18,5 | 18,5 | 18,5 | 7,5 | 15 | П14 | 18,5 | 18,5 | 18,5 | 7 | 15,5 |
| Значения коэффициента связи Спирмэна ρ для изделий | | | | | | | 0,961 | 0,961 | 0,943 | 0,924 | 0,977 |

Полученные значения ρ для пяти исследуемых изделий позволяют сделать вывод о наличии высокой степени связи между разногласиями экспертов при отработке ТК изделий на стадии проектирования и количеством доработок в конструкции и технологии уже в ходе освоения и серийного производства.

Сопоставление статистических данных по вероятностям появления извещений по i -й причине и полученных пофакторных разногласий экспертов позволяют установить функциональную зависимость вида $P = f(Y)$, где в качестве аргумента выступает уровень разногласий экспертов, получаемый в результате обработки данных последней перед освоением изделия экспертизы, а прогнозируемая функция P есть вероятность появления извещений (или приблизительное количество извещений, ожидаемых за период освоения и два года серийного производства).

Математическая модель может быть найдена в результате совместной обработки всех полученных значений p и y . Статистические данные, полученные по пяти исследуемым изделиям одного класса, были нанесены на координатную плоскость. Количество экспериментальных точек составило 100 – значения по 20–ти факторам (причинам) для пяти изделий. Так как диффузность исходных данных значительна, для получения графического вида функциональной зависимости, использовался известный метод медианных центров [19]. Поле точек разделяется на несколько частей, в каждой из них находится медианный центр, т.е. пересечение вертикали и горизонтали слева и справа, выше и ниже которых оказывается равное число точек. Затем через медианные центры проводится плавная кривая (рисунок 2).

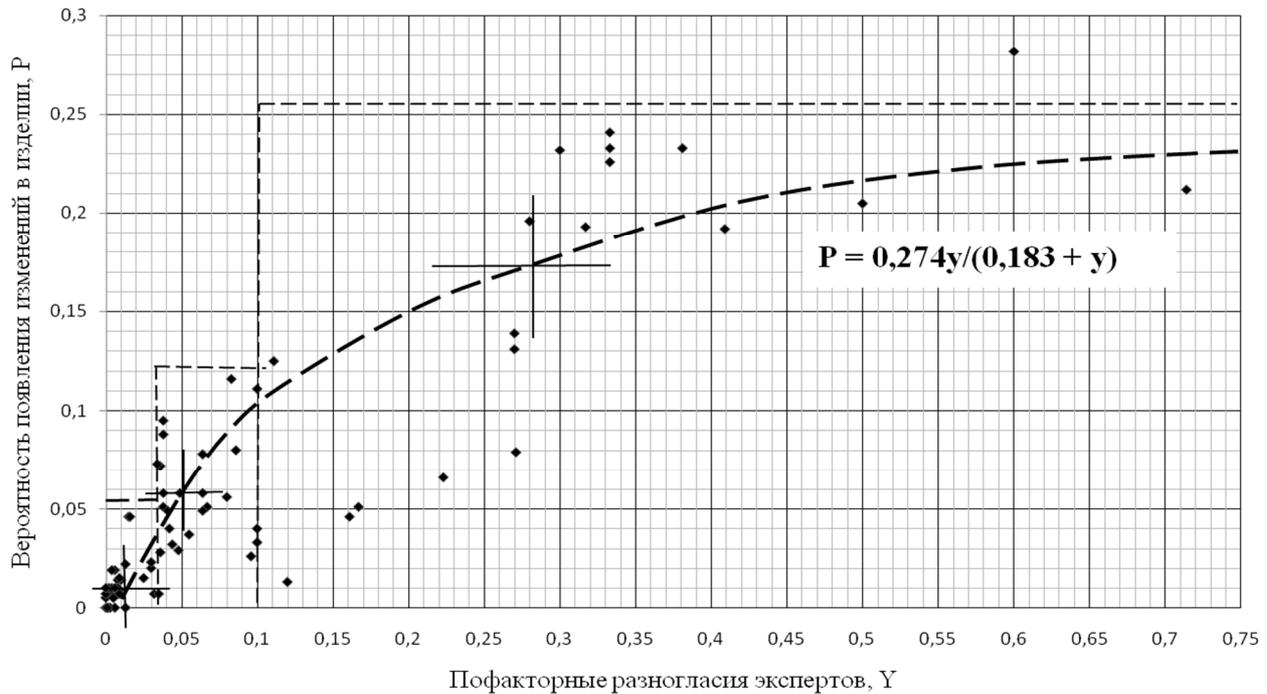


Рисунок 2 – Построение функциональной зависимости вероятности появления изменений в изделии от величины пофакторных разногласий экспертов методом медианных центров

Полученный график зависимости легко аппроксимируется дробно–рациональной функцией вида:

$$y = \frac{ax}{b + x},$$

в которой следует определить коэффициенты a и b через решение системы уравнений вида:

$$\begin{cases} y_1b = ax_1 - x_1y_1; \\ y_2b = ax_2 - x_2y_2, \end{cases}$$

где x_1, x_2, y_1, y_2 – экспериментальные значения двух точек на графике (рисунок 2), с координатами (0,041; 0,05) и (0,276; 0,165).

Получаем $a = 0,274$; $b = 0,183$. Тогда окончательно имеем зависимость вероятности появления извещений p_i от уровня разногласий между экспертами y_i в виде:

$$P_i = \frac{0,274y_i}{0,183 + y_i}. \quad (1)$$

Так как прогнозируемая величина P_i является относительной, для приведения ее к дискретным значениям количества извещений находим приближенное соответствие между интервальными значениями коэффициента технологичности, полученного в ходе экспертных оценок и количеством извещений, появляющихся на этапах освоения и серийного производства (рисунок 3).

Тогда, имея прогнозируемую вероятность появления извещений, количество их по данной причине n_i определяем по формуле:

$$n_i = P_i N, \quad (2)$$

где N – общее количество извещений, соответствующее полученному в ходе экспертных оценок показателю технологичности изделия.

Обобщая формулы (1) и (2), и учитывая, что найденная аппроксимирующая кривая $N = f(K_T)$ описывается уравнением:

$$N = 468,5K_T^2 - 975,96K_T + 563,98,$$

получаем окончательную формулу прогнозируемого количества извещений по соответствующей причине Π_i в виде:

$$n_i = \frac{0,274y_i(468,5K_T^2 - 975,96K_T + 563,98)}{0,183 + y_i}.$$

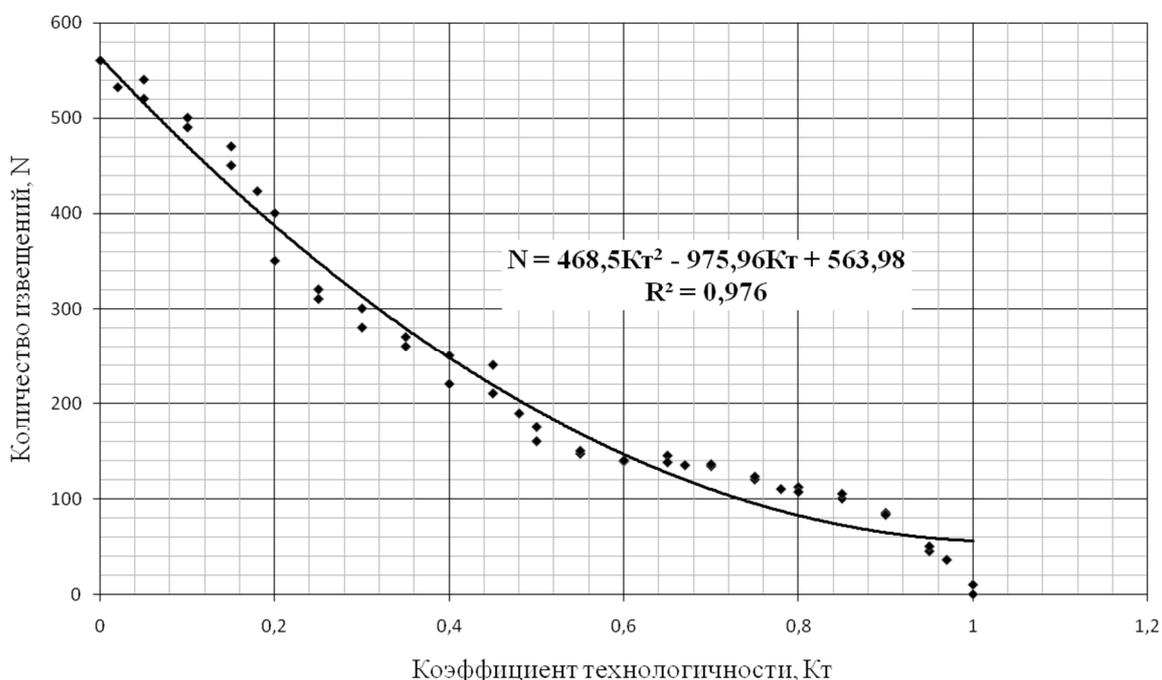


Рисунок 3 – Построение зависимости количества извещений N от коэффициента технологичности K_T с подбором аппроксимирующей функции

Полученная модель позволяет прогнозировать количество извещений, ожидаемое по соответствующей i -й причине при известных значениях корреляционного коэффициента технологичности K_T и уровня разногласий между группами экспертов y_i по i -му фактору. Построение подобных аналитических моделей возможно для любых классов изделий приборостроения, по которым имеются серийно выпускаемые аналоги и накоплена статистика по извещениям. Точность аналитической модели определяется полосой рассеяния экспериментальных точек и точностью идентификации формы распределения, не противоречащей дискретной выборке данных.

Используя модель, удалось спрогнозировать количество извещений по блоку управления 2714–2С, технологичность которого отрабатывалась в ходе проектирования и подготовке к серийному производству. Данные расчета и результаты приведены в таблице 4. Здесь же приведены фактические данные о количестве извещений на изменения, внесенные в КД в период освоения и производства изделия.

Управлять потоком извещений, возникающим на серийных предприятиях приборостроения после передачи КД изготовителю, уже не представляется возможным.

Таблица 4 – Данные расчета прогнозируемой вероятности появления извещений на изменения, вносимые в конструкцию и технологию блока управления.

| Качественный фактор технологичности, Φ_i | Уровень разногласий экспертов, $У_i$ | Причина появления извещения, Π_i | Показатель технологичности, K_T | Рассчитанное по модели количество извещений, $n_{\text{расч}}$ | Фактическое количество извещений, $n_{\text{факт}}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Простота настройки и регулировки (Ф03) | 0,27 | Улучшение качества настройки и регулировки изделия (П09) | 0,68 | 19 | 18 |
| Элементы несущих конструкций (Ф04) | 0,27 | Выбор более простых и совершенных конструкций (П16) | | 19 | 17 |
| Допуски на электрические параметры функциональных узлов, блоков, изделия (Ф09) | 0,333 | Улучшение электрических характеристик (П06) | | 21 | 22 |
| Степень типизации техпроцессов у изготовителя (Ф16) | 0,167 | Создание новых технологических баз и приведение размеров к принятым рядам (П20) | | 15 | 12 |

Поэтому целесообразно прогнозировать размеры этого потока с тем, чтобы, во-первых, заблаговременно выделить некоторые дополнительные мощности инструментальной базы изготовителя для обеспечения технологической подготовки проводимых изменений без ущерба для основного производства, во-вторых, своевременно и качественно обрабатывать извещения, ускоряя документооборот на предприятии. Разработанная модель в этих условиях может дать достоверную информацию о величине потока извещений с классификацией их по причинам появления и сложности реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ирзаев, Г.Х. Система оценки согласованности конструкций радиоэлектронных средств с технологией предприятия-изготовителя на этапе освоения / Г.Х. Ирзаев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2010. – № 1. – С. 257–261.
- Федоров, В.К. Корректировка конструкторской документации как фактор риска возникновения незавершенного производства / В.К. Федоров, Р.С. Гвоздарев, С.А. Архипцев // Экономика и управление в машиностроении. – 2013. – № 5. – С. 19–22.
- Луканин, А.В. Разработка метода внесения изменений в исходные данные системы автоматизированного проектирования и сопровождения конструкторско-технологической документации электрооборудования судов / А.В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 2. – С. 64–66.
- Бурец, Д.В. Управление процессами workflow в конструкторско-технологическом бюро машиностроительного предприятия / Д.В. Бурец // Информационные технологии. – 2007. – № 11. – С. 16–22.
- Карпушкин, Р.А. Извещения об изменениях в T-FLEX DOCS: как это работает/ Р.А. Карпушкин // САПР и графика. – 2012. – №8 (190). – С. 62–64.
- Коблов, Н.Н. Контроль проведения изменений в текстовой конструкторской документации / Н.Н. Коблов, А.А. Коломейцев, С.С. Чекрыгин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 73–77.
- Ирзаев, Г.Х. Исследование системы обработки потоков информации об изменениях в конструкции радиоэлектронных средств на этапах освоения и производства / Г.Х. Ирзаев, А.П. Адамов // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 1 (33). – С. 7.
- Ирзаев, Г.Х. Исследование и моделирование информационных потоков конструкторско-технологических изменений на этапах освоения и серийного производства изделий / Г.Х. Ирзаев // Организатор производства. – 2012. – № 1 (52). – С. 131–135.
- Федоров, В.К. Причины корректировки документации и внесения изменений в производство продукции машиностроения / В.К. Федоров, Р.С. Гвоздарев // Вестник машиностроения. – 2011. – № 8. – С. 78–80.

10. Ирзаев, Г.Х. Модель системы обработки информации о конструкторско–технологических изменениях в радиоэлектронных изделиях при освоении их производства / Г.Х. Ирзаев, А.П. Адамов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 4 (23). – С. 63–70.
11. Ирзаев, Г.Х. Разработка функциональной и организационной структур комплексной системы управления технологичностью промышленных изделий / Г.Х. Ирзаев // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 4. – С. 66–75.
12. Маликов, С.Б. Оценка последствий внесения изменений документов конструкторско–технологической подготовки производства в условиях параллельного выполнения работ / С.Б. Маликов, В.Н. Юрин // Применение ИПИ технологий в производстве: сборник материалов VI всероссийской научно–практической конференции, г. Москва, 11–12 ноября 2008 г. – М.: МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского. – 2008. – С. 75–76.
13. Федоров, В.К. Методика определения трудоемкости корректировки конструкторской документации в специальном машиностроении / В.К. Федоров, Р.С. Гвоздарев, Д.А. Рыжов // Технология машиностроения. – 2012. – № 2. – С. 65–68.
14. ГОСТ 2.506–84. ЕСКД. Правила внесения изменений в конструкторские документы по журналу изменений. – М.: Изд. стандартов, 1984.
15. ГОСТ 2.503–90. ЕСКД. Правила внесения изменений. – М.: Изд. стандартов, 1990.
16. ОСТ 4.000.022–79. Конструкторская документация. Причины и шифры изменений. – М.: Изд. стандартов, 1979.
17. Ирзаев, Г.Х. Экспертный выбор предпочтительного по технологичности варианта изделия методом аналитической иерархии / Г.Х. Ирзаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2007. – № 1–1 (29). – С. 126–130.
18. Ирзаев, Г.Х. Система экспертного анализа технологичности электронных приборов / Г.Х. Ирзаев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 66–71.
19. Новицкий, П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат. – 1991. – 304 с.

Ирзаев Гамид Хайбулаевич

Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий
и прикладной информатики в экономике
367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70.
Tel.: 8 (8722) 624449
E-mail: irzajev@mail.ru

G.KH. IRZAEV

MODEL TO PREDICT CHANGES IN THE DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY PRODUCTS AT THE STAGES OF MASTERING AND SERIES PRODUCTION

Results on the effect on the level of manufacturability to the requirements of the emergence of design and technological changes in the product. A model to predict changes in the product, based on the functional dependence of the number of changes of the level of disagreement between the designers and technologists in the evaluation of qualitative factors manufacturability. The model allows to advance to allocate additional power instrumentation manufacturer to ensure technological preparation of changes.

Keywords: design manufacturability, design and technological change, forecast, differences experts, classifier, quality factor.

BIBLIOGRAPHY

1. Irzayev, G.Kh. Sistema otsenki soglasovannosti konstruksiy radioelektronnykh sredstv s tekhnologiyey predpriyatiya–izgotovatelya na etape osvoyeniya / G.Kh. Irzayev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aérokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta). – 2010. – № 1. – S. 257–261.

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.43

А.В. ПАССАР, Д.В. ТИМОШЕНКО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАДИАЛЬНО–ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА

В работе предлагается использовать оптимизационный алгоритм метода неопределенных множителей Лагранжа в составе предложенного в более ранних работах авторов комплексного метода расчета, объединяющего положительные стороны существующих математических моделей и методов расчета турбины. Представлены характеристики турбин по КПД и по мощности в стационарном потоке. На основе этих характеристик показано, что с уменьшением геометрических размеров на входе и на выходе из рабочего колеса КПД падает, а эффективная мощность растет. Представлены характеристики турбин по КПД и по мощности в нестационарном потоке комбинированного двигателя. На основе этих характеристик показано, что с уменьшением геометрических размеров на входе и на выходе из рабочего колеса коэффициент использования располагаемой энергии падает, а эффективная мощность растет.

Ключевые слова: комплексный метод расчета, степень радиальности, степень реактивности, коэффициент напора, характеристики турбины, проточная часть, радиально–осевая турбина.

Комбинированный двигатель внутреннего сгорания является сложным техническим объектом, эффективная работа которого определяется работой каждой из его подсистем разных уровней сложности.

Импульсную систему газотурбинного наддува следует отнести к наиболее сложным системам. Необходимо отметить, что природа нестационарного потока в этих системах наддува такова, что турбина турбокомпрессора работает в условиях переменных давлений и температур, которые значительно меняются в течение рабочего цикла двигателя. Это обстоятельство накладывает определенные трудности при выборе геометрии проточной части турбины.

Необходимо констатировать, что турбина, как элемент сложной системы – комбинированный двигатель внутреннего сгорания оказывает доминирующее влияние на эффективный КПД двигателя в целом. Следует отметить, что хорошо отработанная конструкция проточной части радиально–осевой турбины и ее согласование с поршневым двигателем позволяет получить экономичность двигателя на номинальном режиме до 8 г/кВт.ч [1], а на частичных режимах значительно больше. Это позволяет даже наши отечественные конструкции приблизить к лучшим образцам мирового дизелестроения.

Однако отработка конструкции проточной части турбины в отечественном дизелестроении идет интуитивно с привлечением большого объема экспериментальных работ и длится годами. А установленные радиально–осевые турбины на комбинированных двигателях отечественного производства не доведены до достаточного уровня совершенства. Это связано, прежде всего, с тем, что в настоящее время отсутствует хорошо отработанный метод профилирования проточной части турбины на стадии проектирования.

Основываясь на анализе существующих методов расчета турбин, в работах [2, 3] был предложен комплексный метод к проектированию проточной части радиально–осевой турбины, работающей в условиях нестационарного потока.

В настоящей работе будет представлен технологический процесс проектирования проточной части турбины ТКР–14 форсированного комбинированного поршневого двигателя. Следует оговориться, что здесь не рассматривается этап – оценка проектного решения на базе расчета осесимметричного вихревого потока невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально–осевой турбины (метод Я.А. Сироткина [4]). На данном этапе есть особенности, которые целесообразно представить в последующих работах.

Предложенный комплексный метод к проектированию проточной части радиально–осевой турбины комбинированного двигателя состоит из четырех этапов.

На первом этапе производится проектирование проточных частей радиально–осевой турбины с различными геометрическими параметрами.

Второй этап заключается в определении эффективности проточных частей турбин, спроектированных на первом этапе. С этой целью, используя модель расчета ступени на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении [5], выполняется расчет характеристик турбины: $\eta_T = f(\bar{H}_T)$ и $N_T = f(\bar{H}_T)$. Проверка адекватности предложенной модели осуществлялась путем сравнения заводских характеристик полученных экспериментально, с расчетными характеристиками [3]. Расчет коэффициентов потерь энергии производился по зависимостям, предложенным в работе [6].

Третий этап заключается в расчете импульсов давлений $p_0^* = f(\varphi)$ и температур $T_0^* = f(\varphi)$ на входе в турбину с геометрическими параметрами, определенными на первом и втором этапах. Для реализации третьего этапа используется смешанная задача Коши для выпускной системы комбинированного двигателя с использованием метода характеристик

Четвертый этап включает в себя решение вопроса об оценке эффективности срабатывания выпускных газов в турбине. В основу программы расчета на этом этапе положен метод расчета турбины на среднем радиусе. В качестве исходной информации на этом этапе используются диаграммы изменения давления и температуры выпускных газов перед турбиной, полученные расчетным путем на предыдущем этапе. Выполнив расчет различных конструктивных вариантов турбины, определяем максимальное значение интегрального КПД

срабатывания импульса $\eta_{\text{ти}} = \frac{\int_0^{\tau} H_T G_T \eta_T d\tau}{\int_0^{\tau} H_T G_T d\tau}$, максимальное значение мощности турбины

$N_T = \int_0^{\tau} \frac{H_T G_T \eta_T d\tau}{1000}$ и соответствующие этим значениям проточные части турбины.

Дальнейшие расчетные исследования проводились в соответствии с содержанием этапов комплексного метода.

Во многих задачах на разыскание наибольших и наименьших значений функции вопрос сводится к разысканию максимумов и минимумов функции от нескольких переменных, которые не являются независимыми, а связаны друг с другом некоторыми добавочными условиями (например, они должны удовлетворять данным уравнениям). Такие задачи позволяет выполнить метод множителей Лагранжа [7].

При выборе геометрии проточной части турбины необходим подбор оптимальных параметров: степени реактивности ρ , относительной окружной скорости $\bar{u}_1 = u_1 / c_{\text{ад}}$ и параметра $m = (u_2 / w_2) \cos \beta$, характеризующего элементы треугольника скоростей на выходе

из турбины. Для решения этой задачи в работе [7] предлагается использовать метод множителей Лагранжа.

При выборе оптимальных параметров используется функция Лагранжа в следующем виде:

$$L(\bar{u}_1, \rho, m, \lambda) = \eta_u(\bar{u}_1, \rho, m) + \lambda f(\bar{u}_1, \rho, m), \quad (1)$$

где λ – неопределенный множитель;

η_u – окружной КПД ступени;

$f(\bar{u}_1, \rho, m)$ – уравнение связи параметров \bar{u}_1 , ρ и m .

$$\eta_u = 1 - (1 - \rho)(1 - \varphi^2) + \mu^2 \bar{u}_1^2 \left(\cos^2 \beta_2 \frac{1 - 2\psi^2 m}{\psi^2 m^2} + 1 \right); \quad (2)$$

$$f(\bar{u}_1, \rho, m) = \mu^2 \bar{u}_1^2 \left(\frac{\cos^2 \beta_2}{m^2} - \psi^2 \right) - \psi^2 + (1 - \rho) \times \\ \times (1 - \varphi^2) \psi^2 + 2 \bar{u}_1 \cos \alpha_1 \varphi \psi^2 \sqrt{1 - \rho}. \quad (3)$$

Условиями максимума являются:

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{u}_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \rho} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial m} = 0; \quad f = 0. \quad (4)$$

Из условий максимума определяются оптимальные параметры:

$$\lambda = \frac{1 - m\psi^2}{\psi^2}; \quad (5)$$

$$\rho_{\text{опт}} = 1 - \left[\frac{(1 - m\psi^2) \varphi \cos \alpha_1 \bar{u}_1}{m\psi^2 (1 - \varphi^2)} \right]^2; \quad (6)$$

$$m_{\text{опт}} = \frac{1}{\psi^2} \left[1 - \sqrt{\frac{\mu^2 (1 - \varphi^2) (1 - \cos^2 \beta_2 \psi^2)}{\cos^2 \alpha_1 \varphi^2 + \mu^2 (1 - \varphi^2)}} \right]; \quad (7)$$

$$\bar{u}_{1\text{опт}} = \frac{\psi}{\sqrt{\mu^2 \left(\frac{\cos^2 \beta_2}{m^2} - \psi^2 \right) + \frac{(1 - m^2 \psi^4) \varphi^2 \cos^2 \alpha_1}{m^2 \psi^2 (1 - \varphi^2)}}}. \quad (8)$$

Результаты реализации первого этапа. Поскольку на данном этапе проведения расчетов, геометрия проточной части неизвестна, определить потери работоспособности газа не представляется возможным. Поэтому, предварительно были приняты следующие значения коэффициентов скорости: в направляющем аппарате $\varphi = 0,95$; в рабочем колесе $\psi = 0,9$.

Для исходных значений $\alpha_1 = 18^\circ$; $\beta_2 = 36^\circ$; $\mu = 0,52$; $\varphi = 0,95$; $\psi = 0,9$ по уравнениям (6) – (8) получаем: $m_{\text{опт}} = 1,085$; $\bar{u}_1 = 0,648$; $\rho_{\text{опт}} = 0,315$.

Для найденных оптимальных значений параметров с использованием модели расчета ступени на среднем радиусе в обратной постановке были рассчитаны высоты лопаток на входе l_1 и выходе из рабочего колеса l_2 . Высоты лопаток были определены на расход газа $G_{\text{т.расч}} = 0,45 \text{ кг/с}$ и степени расширения газов $\pi_{\text{т.расч}} = 1,698$ – турбина № 1; $\pi_{\text{т.расч}} = 1,887$ – турбина № 2; $\pi_{\text{т.расч}} = 2,075$ – турбина № 3; $\pi_{\text{т.расч}} = 2,264$ – турбина № 4.

По результатам проведенного расчета построена проточная часть рабочего колеса и определена длина средней линии профиля. Далее используя модель расчета ступени на среднем радиусе в прямой постановке, уточнены коэффициенты скорости и расход рабочего тела.

Теперь с новыми коэффициентами скорости по формулам (6)–(8) уточняем параметры: $m_{\text{опт}}$; \bar{u}_1 ; $\rho_{\text{опт}}$. Далее используя модель расчета ступени на среднем радиусе в обратной постановке вновь рассчитаны высоты лопаток на входе l_1 и выходе из рабочего колеса l_2 . По результатам проведенного расчета построена проточная часть рабочего колеса (рисунок 1).

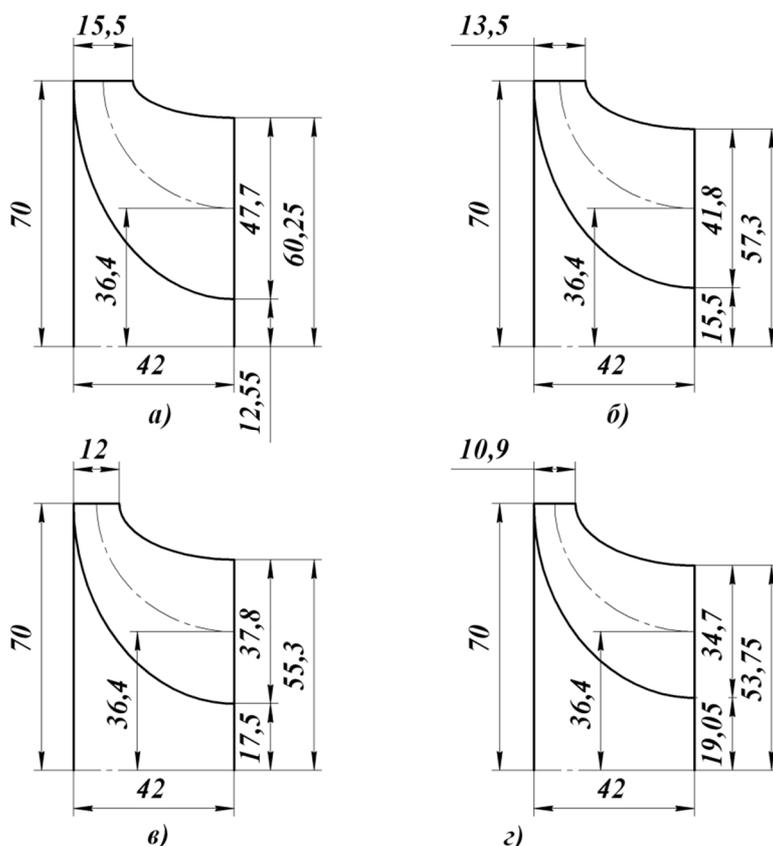


Рисунок 1 – Рабочие колеса турбины ТКР–14 спроектированные с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа:

- а) турбина №1 $\pi_{\text{т.расч}} = 1,698$, $n_{\text{тк}} = 44773 \text{ мин}^{-1}$; б) турбина №2 $\pi_{\text{т.расч}} = 1,887$, $n_{\text{тк}} = 49267 \text{ мин}^{-1}$;
 в) турбина №3 $\pi_{\text{т.расч}} = 2,075$, $n_{\text{тк}} = 53050 \text{ мин}^{-1}$; з) турбина №4 $\pi_{\text{т.расч}} = 2,264$, $n_{\text{тк}} = 56295 \text{ мин}^{-1}$

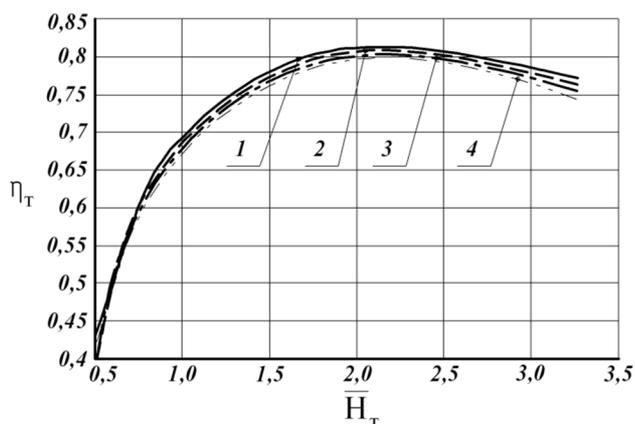


Рисунок 2 – Изменение КПД турбин:
 1 – турбина №1; 2 – турбина №2;
 3 – турбина №3; 4 – турбина №4

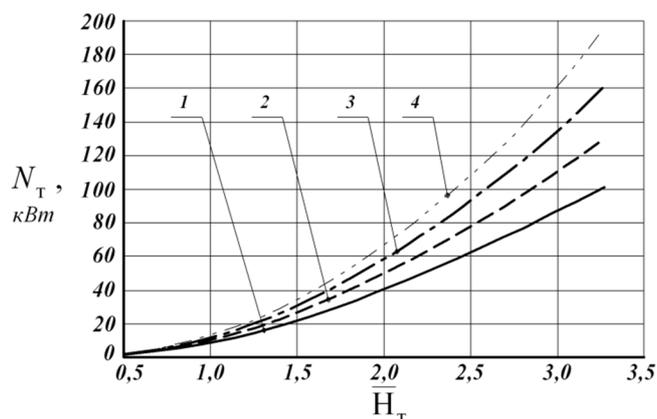


Рисунок 3 – Изменение эффективной мощности турбин:
 1 – турбина №1; 2 – турбина №2;
 3 – турбина №3; 4 – турбина №4

Результаты реализации второго этапа. При реализации второго этапа получены результаты расчета характеристик турбины, которые показали следующее.

1) В диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_T = 0,5 \div 0,75$ турбины развивают примерно равный КПД η_T . В диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_T = 0,75 \div 3,25$, КПД η_T возрастает от турбины № 4 к турбине № 1 (рисунок 2).

2) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора эффективная мощность N_T возрастает от турбины № 1 к турбине № 4 (рисунок 3).

На основании реализации второго этапа можно сделать следующие выводы. С уменьшением геометрических размеров на входе и на выходе из рабочего колеса КПД турбины η_T падает, а эффективная мощность N_T растет.

Результаты реализации третьего этапа. В ходе исследований при реализации третьего этапа использовалась программа, составленная на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеанского государственного университета [3]. Программа позволяет производить расчет импульсов давлений $p_0^* = f(\varphi)$ и температур $T_0^* = f(\varphi)$ в выпускном трубопроводе перед турбиной. Адекватность расчета импульса давлений неоднократно проверена в работе [8]. Результаты расчета представлены на рисунках 4–7.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч} = 1,698$ (рисунок 4). На рисунке 4 приведены диаграммы изменения давления во впускном трубопроводе p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбину № 1 на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi = 53^\circ 27'$.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч} = 1,887$ (рисунок 5). На рисунке 5 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбину № 2 на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi = 38^\circ 18'$.

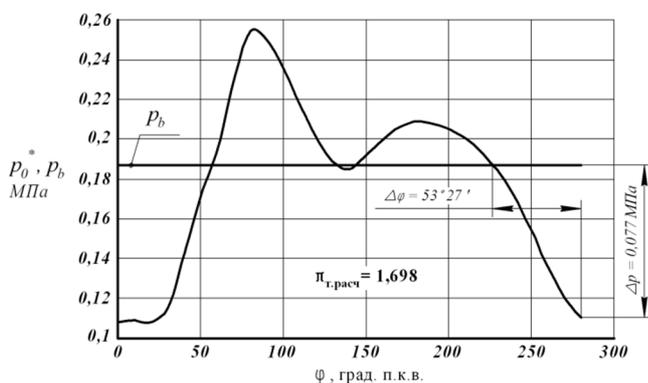


Рисунок 4 – Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч} = 1,698$

турбина № 1 $n_{тк} = 44538 \text{ мин}^{-1}$

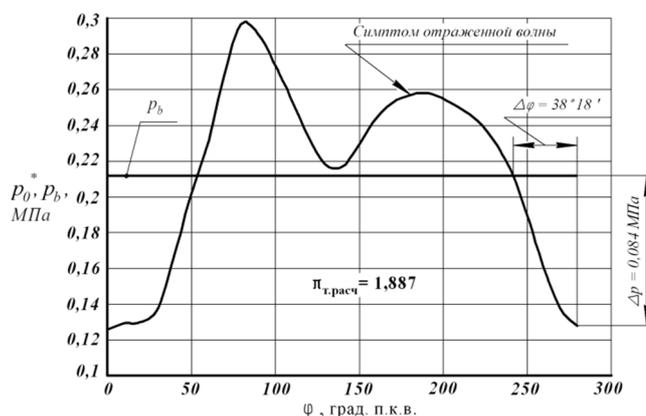


Рисунок 5 – Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч} = 1,887$

турбина № 2 $n_{тк} = 48688 \text{ мин}^{-1}$

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч} = 2,075$ (рисунок 6). На рисунке 6 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбину № 3 на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi = 30^\circ 51'$.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч} = 2,264$ (рисунок 7). На рисунке 7 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубо-

проводе p_0^* на входе в турбину № 4 номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi = 27^\circ 40'$.

Как показали результаты расчета уменьшение геометрических размеров на входе и на выходе из рабочего колеса турбины, приводит к падению располагаемой продолжительности продувки $\Delta\varphi$ (рисунки 4–7), к росту давления в выпускном трубопроводе, кривая давления видоизменяется (рисунки 5–7). Понижение давления после максимума происходит более полого, кривая растягивается и обозначается тенденция к образованию отраженной волны. Хорошо известно что [1], такое изменение кривой давления является нежелательным, так как вызывает ухудшение продувки и наполнения цилиндров и увеличение удельного расхода топлива.

Результаты реализации четвертого этапа. В процессе проведения исследований четвертого этапа дана сравнительная оценка проектных решений проточной части на основании следующих критериев: коэффициента использования располагаемой энергии импульса $\eta_{\text{ти}}$ (таблица 1) и эффективной мощности турбины N_T (рисунок 8).

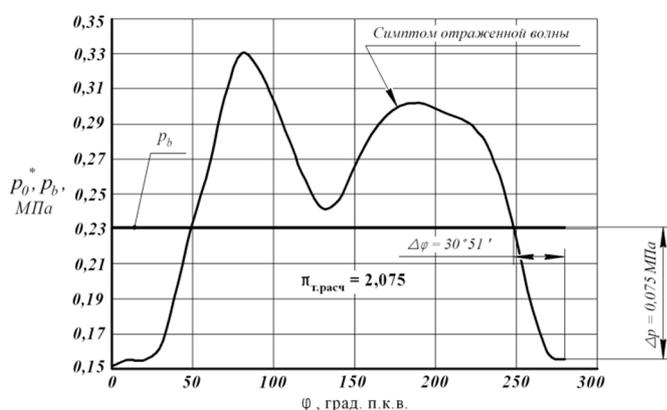


Рисунок 6 – Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{\text{T,расч}} = 2,075$

турбина № 3 $n_{\text{ТК}} = 51369 \text{ мин}^{-1}$

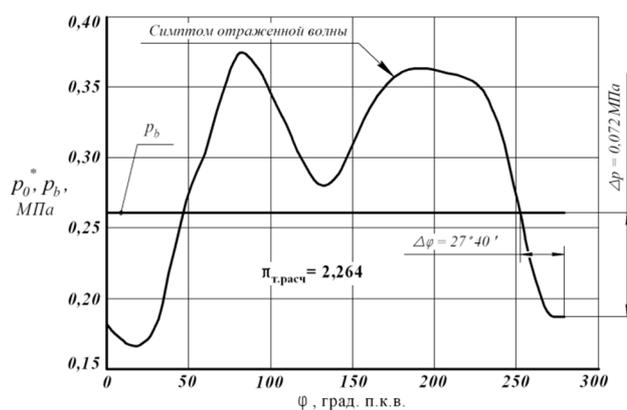


Рисунок 7 – Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{\text{T,расч}} = 2,264$

турбина № 4 $n_{\text{ТК}} = 55526 \text{ мин}^{-1}$

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента использования располагаемой энергии.

| № турбины | Турбина № 1 $\pi_{\text{T,расч}} = 1,698$ | Турбина № 2 $\pi_{\text{T,расч}} = 1,887$ | Турбина № 3 $\pi_{\text{T,расч}} = 2,075$ | Турбина № 4 $\pi_{\text{T,расч}} = 2,264$ |
|--------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\eta_{\text{ти}}$ | 0,8 | 0,793 | 0,788 | 0,787 |

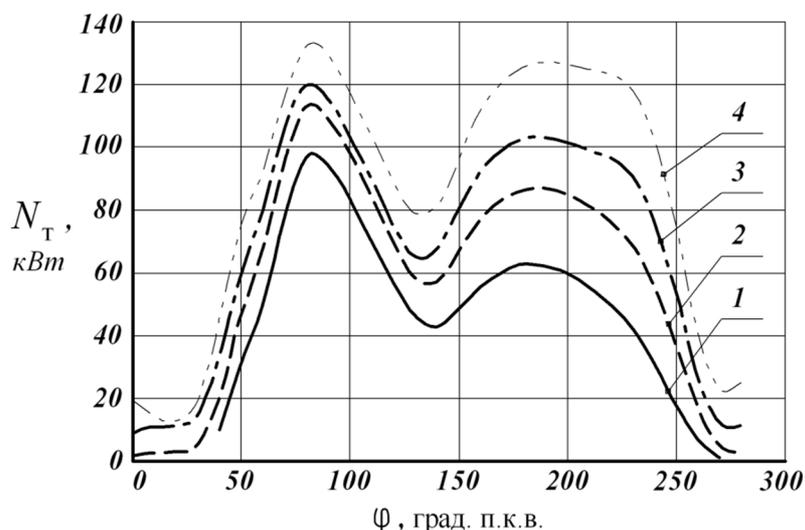


Рисунок 8 – Изменение эффективной мощности турбин турбокомпрессора ТКР-14:
1 – турбина № 1; 2 – турбина № 2; 3 – турбина № 3; 4 – турбина № 4.

Результаты расчетов показали следующее:

1) Турбина № 1 $\pi_{т.расч} = 1,698$ является наиболее эффективной, так как развивает наибольшую располагаемую продолжительность продувки $\Delta\varphi = 53^\circ 27'$ (рисунок 4) и имеет самый высокий коэффициент использования располагаемой энергии импульса $\eta_{\text{ou}} = 0,8$ (таблица 1).

2) Наибольшую эффективную мощность N_T развивает турбина № 4 (рисунок 8), однако как показали результаты расчета предыдущего этапа, эта турбина имеет ярко выраженный симптом отраженной волны и наименьшую располагаемую продолжительность продувки $\Delta\varphi = 27^\circ 40'$ (рисунок 7). Поэтому на основании проведенных расчетов, компромиссным решением будет турбина № 1.

Выводы:

1) На основании проведенных исследований по оценке предварительных геометрических параметров и соответственно выбранному расчетному режиму на компромиссный вариант между коэффициентом использования располагаемой энергии $\eta_{\text{тu}}$ и эффективной мощностью турбины N_T выходит турбина № 1.

2) С уменьшением геометрических размеров на входе и на выходе из рабочего колеса уменьшается коэффициент использования располагаемой энергии импульса $\eta_{\text{тu}}$ (таблица 1), а эффективная мощность турбины N_T растет (рисунок 8), однако падает располагаемая продолжительность продувки $\Delta\varphi$ (рисунки 4–7).

3) Анализ полученных результатов показывает, что необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с изучением структуры потока в проточной части радиально–осевой турбины, работающей в составе комбинированного двигателя. Для этого необходимо привлечение пространственных методов расчета турбины, которые позволяют на основе проведенных расчетов построить линии тока в проточной части, а также выявить отрывные зоны как обратный ток в идеальной жидкости.

Применение оптимизационного алгоритма метода неопределенных множителей Лагранжа на первом этапе комплексного метода расчета можно считать оправданным и рекомендовать его к применению в составе комплексного метода расчета при выборе геометрических параметров проточной части турбины, работающей в составе комбинированного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симсон, А.Э. Газотурбинный наддув дизелей / А.Э. Симсон. М.: Машиностроение, 1964. – 248 с.
2. Лашко, В.А. Метод проектирования проточной части радиально–осевой турбины комбинированного двигателя / В.А. Лашко, А.В. Пассар // Двигателестроение. – 2011. – № 3(245). – С. 13–19.
3. Пассар, А.В. Проектирование проточных частей радиально–осевой турбины работающей в условиях нестационарного потока / А.В. Пассар, В.А. Лашко. Владивосток: Дальнаука, 2013. – 289 с.
4. Пассар, А.В. Аналитический обзор пространственных методов расчета турбины / А.В. Пассар, В.А. Лашко // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 9. – Приложение. – С. 13–24.
5. Пассар, А.В. Аналитический обзор методов расчета турбины на среднем радиусе / А.В. Пассар, В.А. Лашко // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 9. – Приложение. – С. 2–12.
6. Лашко, В.А. Расчет потерь кинетической энергии в проточной части турбины как одна из проблем при реализации комплексного подхода / В.А. Лашко, А.В. Пассар // Вестник ТОГУ. – 2011. – № 1(20). – С. 79–90.
7. Митрохин, В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительных турбин на стационарных и переходных режимах / В.Т. Митрохин. М.: Машиностроение, 1974. – 220 с.
8. Лашко, В.А. Проектирование проточных частей центростремительной турбины комбинированного двигателя внутреннего сгорания: учеб. пособ. / В.А. Лашко. Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2000. – 135 с.

Пассар Андрей Владимирович

Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории «Численные методы математической физики»
Тел. 8 909 874 16 23
E-mail: passar_av@mail.ru

Тимошенко Денис Владимирович

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»
Тел. 8 924 108 93 49
E-mail: kafdvs@rambler.ru

A.V. PASSAR, D.V. TYMOSHENKO

DESIGN FLOW OF FRANCIS TURBINE USING THE METHOD OF LAGRANGE MULTIPLIERS

In work it is offered to use optimization algorithm of a method of uncertain multipliers Lagrange in structure of offered in earlier works of authors of a complex method of the calculation uniting the positive parties of existing mathematical models and methods of calculation of the turbine. Characteristics of turbines on efficiency and on capacity in a stationary stream are presented. On the basis of these characteristics it is shown, that with reduction of the geometrical sizes by an input and on an output from the driving wheel of efficiency falls, and effective power grows. Characteristics of turbines on efficiency and on capacity in a non-stationary stream of the combined engine are presented. On the basis of these characteristics it is shown, that with reduction of the geometrical sizes by an input and on an output from the driving wheel the operating ratio of had energy falls, and effective power grows.

Keywords: a complex method of calculation, a degree of radiality, a degree of reactance, factor of a pressure, the characteristic of the turbine, a flowing part, the radially-axial turbine.

BIBLIOGRAPHY

1. Simson, A.E. Gazoturbinnyy nadduv dizeley / A.E. Simson. M.: Mashinostroyeniye, 1964. – 248 s.
2. Lashko, V.A. Metod proyektirovaniya protochnoy chasti radialno-osevoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya / V.A. Lashko, A.V. Passar // Dvigatelistroyeniye. – 2011. – № 3(245). – S. 13–19.
3. Passar, A.V. Proyektirovaniye protochnykh chastey radialno-osevoy turbiny rabotayushchey v usloviyakh nestatsionarnogo potoka / A.V. Passar, V.A. Lashko. Vladivostok: Dalnauka, 2013. – 289 s.
4. Passar, A.V. Analiticheskij obzor prostranstvennykh metodov rascheta turbiny / A.V. Passar, V.A. Lashko // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2013. – № 9. – Prilozhenie. – S. 13–24.
5. Passar, A.V. Analiticheskij obzor metodov rascheta turbiny na srednem radiuse / A.V. Passar, V.A. Lashko // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2013. – № 9. – Prilozhenie. – S. 2–12.
6. Lashko, V.A. Raschet poter kineticheskoy energii v protochnoy chasti turbiny kak odna iz problem pri realizatsii kompleksnogo podkhoda / V.A. Lashko, A.V. Passar // Vestnik TOGU. – 2011. – № 1(20). – S. 79–90.
7. Mitrokhin, V.T. Vybory parametrov i raschet tsentrostremitelnykh turbin na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh / V.T. Mitrokhin. M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 220 s.
8. Lashko, V.A. Proyektirovaniye protochnykh chastey tsentrostremitelnoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya: ucheb. posob. / V.A. Lashko. Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta, 2000. – 135 s.

Passar Andrey Vladimirovich

Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science, Khabarovsk
Ph. D., the senior scientific employee of laboratory «Numerical methods of mathematical physics»
Ph. 8 909 874 16 23
E-mail:passar_av@mail.ru

Timoshenko Denis Vladimirovich

Pacific state university, Khabarovsk
Ph. D., the senior lecturer of faculty «Internal combustion engines»
Ph. 8 924 108 93 49
E-mail:kafdvs@rambler.ru

А.М. ИВАНОВ, Е.С. ЛУКИН

ПРОЧНОСТЬ И МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотрено упрочнение низкоуглеродистой стали ВСтЗсп комбинированным воздействием закалкой и равноканальным угловым прессованием. Определены характеристики прочности и пластичности стали в состоянии поставки и упрочненной стали после циклического нагружения. Проведено исследование влияния малоцикловых испытаний на прочность и энергетические затраты при пластическом деформировании статически растягиваемых образцов из конструкционных и субмикроструктурных сталей. Установлено, что доля энергии, поглощенной при пластическом деформировании на стадии равномерного удлинения материала, с увеличением количества циклов нагружения уменьшается, а доля выделившейся теплоты наоборот увеличивается.

Ключевые слова: сталь, прочность, пластичность, усталость, интенсивная пластическая деформация, закалка, равноканальное угловое прессование, энергия, поглощенная энергия, теплота.

Одним из способов исследования усталости материалов при циклически изменяющихся во времени нагрузках является испытание образцов на циклическое нагружение по схеме «растяжение–сжатие», в том числе «растяжение – разгрузка» – так называемое «отнулевое» циклическое нагружение.

В связи с трудностью прямой оценки усталостных повреждений в металлах такая оценка производится по параметрам, характеризующим изменение физико–механических свойств в связи с деградацией материала, например, по потере пластичности. Для исследования и оценки зарождения и накопления повреждений в материале в результате воздействия циклических нагрузок строятся различные модели.

Поскольку в результате накопления и развития повреждений в металлических материалах в процессе циклического нагружения изменяется их пластичность, то изменение энергетических затрат при статическом нагружении может характеризовать усталостную поврежденность материала.

Определенный интерес представляет исследование влияния циклических нагрузок на энергетические характеристики металлических материалов с субмикроструктурной структурой.

Одним из методов формирования в материалах нано– и субмикроструктурной структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД) [1, 2]. Также, для изменения структуры материала используются различные виды термической обработки (ТО). В настоящее время работ, посвященных исследованию усталостных свойств ультрамелкозернистых металлических материалов, не так много. Исследованию комплекса механических свойств стали 06МБФ с субмикроструктурной структурой, в том числе усталостного разрушения, посвящена работа [3], в которой обнаружено повышение прочностных свойств при статическом и циклическом нагружениях. Повышенные усталостные свойства ультрамелкозернистого титана отмечены в [4], в которой достигнуто повышение предела выносливости в 1,5 раза. Повышение долговечности в области высоких амплитуд напряжений и рост предела выносливости установлены в [5]. Для эффективного управления структурой и свойствами материалов используются комбинированные методы обработки, в том числе термо–механические (ТМО), в частности ТО и равноканального углового прессования (РКУП) [6,7]. Качественное исследование усталостного деформирования образцов из стали 35СтМо4 проведено в [8].

Целью работы является исследование влияния малоцикловых испытаний на прочность и энергетические затраты при пластическом деформировании статически растягиваемых образцов из конструкционных и субмикроструктурных сталей.

Объект исследования – низкоуглеродистая сталь ВСтЗсп (0,17 % С, 0,2 % Si, 0,54 % Mn, 0,14 % Cr, 0,14 % Ni и 0,25 % Cu, остальное Fe). Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry–Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)».

Схема термопластической обработки заготовки представляет собой последовательное применение закалки и РКУП.

Как известно, закалка повышает твердость и прочность, снижает вязкость и пластичность, но вместе с тем исключает мягкие ферритные включения, образуется мартенситная структура и уменьшается размер зерна. Закалка в воде объемных заготовок из стали ВСтЗсп размером в $\varnothing 20 \times 100$ мм осуществлялась с температуры 1133 К. Нагрев заготовки осуществлялся в течение 1 часа в муфельной печи «Nabertherm».

Для достижения высоких степеней деформации применяются методы интенсивной пластической деформации. РКУ–прессование объемных заготовок из ВСтЗсп выполнялось с помощью технологической оснастки с углом пересечения каналов прессования $\Phi=120^\circ$ на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ с максимальным усилием 1250 кН. РКУП производилось по маршруту С в 2 прохода при температуре 623 К. Степень деформации заготовки при РКУП за 2 прохода составляет $\varepsilon_2=1,34$ %.

Использовалась также последовательная обработка закалкой и РКУП.

Механические характеристики стали ВСтЗсп определяли из испытаний на одноосное растяжение стандартных гладких образцов на универсальной испытательной машине «Инстрон–1195». Данные механических свойств стали ВСтЗсп представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики стали ВСтЗсп в различных состояниях.

| № режима | Состояние материала | Количество циклов, N | Механические свойства | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | | | σ_T , МПа | σ_B , МПа | δ_K , % |
| 1 | Исходное состояние – состояние поставки | 0 | 329 | 484 | 23,9 |
| 2 | | 500 | 339 | 485 | 25,3 |
| 3 | После ТМО: Закалка в воде от температуры 1133 К + РКУП по маршруту С в $n=2$ прохода при температуре 623 К | 0 | 850 | 858 | 4,8 |
| 4 | | 500 | 842 | 849 | 5,7 |
| 5 | | 1000 | 858 | 865 | 5,2 |
| 6 | | 1500 | 854 | 861 | 5,7 |

Как видно из таблицы 1, ТМО приводит к значительному повышению прочности и снижению пластичности стали. При уровне максимальных напряжений цикла $0,8\sigma_T$ увеличение количества циклов нагружения в данном интервале не оказывает значительного влияния на механические свойства ВСтЗсп.

При циклических испытаниях осуществлялось нагружение с заданным размахом (мягкое нагружение) при отнулевом до максимальной нагрузки $P_{max}=0,8P_T$ на универсальной машине «Инстрон–1195». Количество циклов варьировалось от 0 до 1500.

Оценка удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_S и количества выделившейся теплоты q проводилась с применением разработанной экспериментально–расчетной методики на основе решения обратной задачи теплопроводности с постоянными коэффициентами при пластическом деформировании металлов на стадии упрочнения [9] и использованной в [10, 11].

На рисунке 1, а представлен график деформирования стали ВСтЗсп в состоянии поставки, а на рисунке 1, б – зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_S и количества выделившейся теплоты q .

Как видно из рисунка 1, б, значение поглощенной при пластической деформации энергии $e_s = 42,4$ МДж/м³, что составляет 68% от удельной работы пластических деформаций $a_p = 62,6$ МДж/м³ на стадии упрочнения.

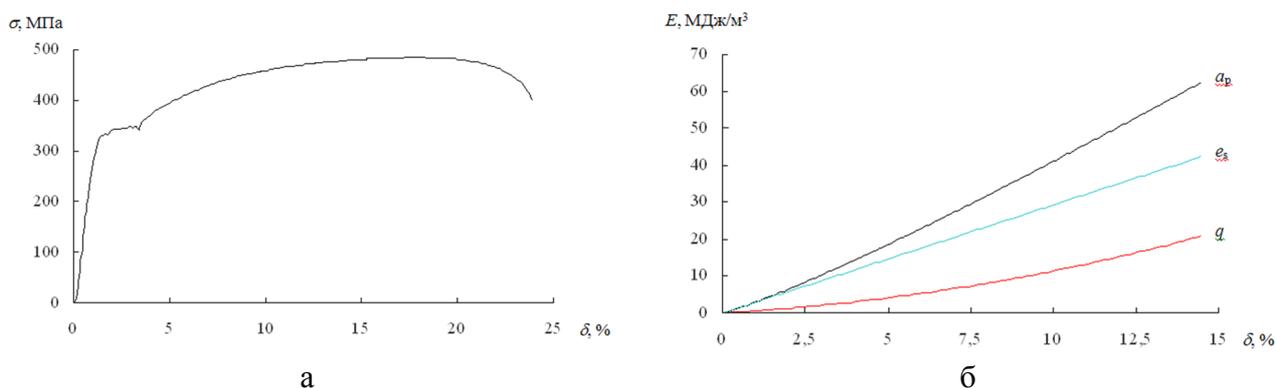


Рисунок 1 – Диаграмма деформирования (а) и зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_s и количества выделившейся теплоты q для стали ВСт3сп в состоянии поставки (б)

«Отнулевое» циклическое нагружение с $\sigma_{max} = 0,8\sigma_T$ и количеством циклов $N = 500$ приводит к некоторому увеличению энергоемкости стали ВСт3сп (рисунок 2 и таблица 2). При этом доля энергии поглощения e_s (59%) уменьшается, в то время как доля выделившегося тепла q увеличивается (41 %) по сравнению с состоянием поставки.

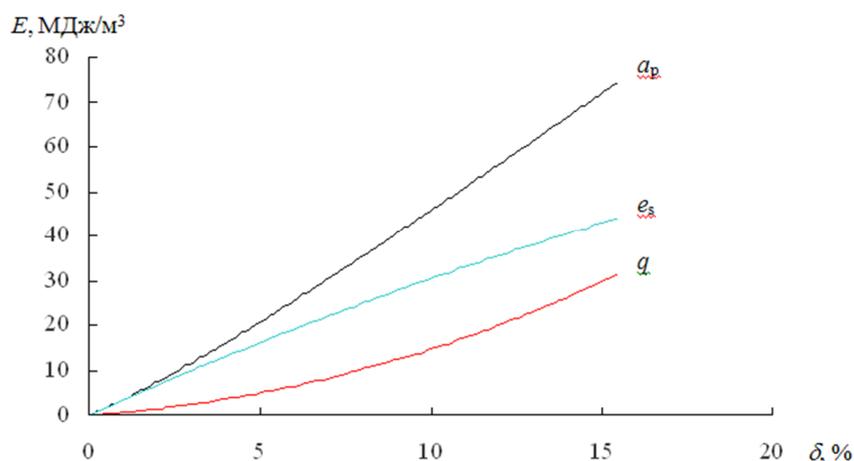


Рисунок 2 – Зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_s и количества выделившейся теплоты q для стали ВСт3сп после $N=500$ циклов нагружения в состоянии поставки при $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$

Таблица 2 – Энергетические затраты при деформировании образцов из стали ВСт3сп на стадии упрочнения.

| № | N | $\delta_{сду}, \%$ | Энергетические затраты, МДж/м ³ | | |
|------------------------------------------------------------------------|------|--------------------|--------------------------------------------|-------|------|
| | | | a_p | e_s | q |
| <i>Исходное состояние – состояние поставки</i> | | | | | |
| 1 | 0 | 14,4 | 62,6 | 42,4 | 20,2 |
| 2 | 500 | 15,5 | 74,5 | 44 | 30,5 |
| <i>После ТМО (Закалка в воде с 1133 К (1 ч) + РКУП, С, 623 К, n=2)</i> | | | | | |
| 3 | 0 | 0,82 | 11,5 | 9,3 | 2,2 |
| 4 | 500 | 1,14 | 14,9 | 11,7 | 3,2 |
| 5 | 1000 | 2,8 | 45,4 | 34,3 | 11,1 |
| 6 | 1500 | 3,07 | 57,7 | 33,9 | 23,8 |

Как было установлено ранее из анализа кривой деформирования стали ВСтЗсп, удельная работа деформирования упрочненной посредством РКУП стали по сравнению со сталью с крупнокристаллической структурой уменьшается [10]. Такая же картина наблюдается и для ВСтЗсп, упрочненной ТМО (таблица 2). При этом удельная работа, затраченная на пластическое деформирование образца из мелкозернистой стали (позиция 3 в таблице 2 и рисунок 3), на ~18,5% меньше, чем в случае крупнозернистой структуры (позиция 1). Для мелкозернистой стали количество выделившейся теплоты составляет ~19% от совершенной работы, остальная часть поглощается материалом. Доля поглощенной энергии для упрочненной стали больше (~81 %), чем в исходном состоянии (~68%).

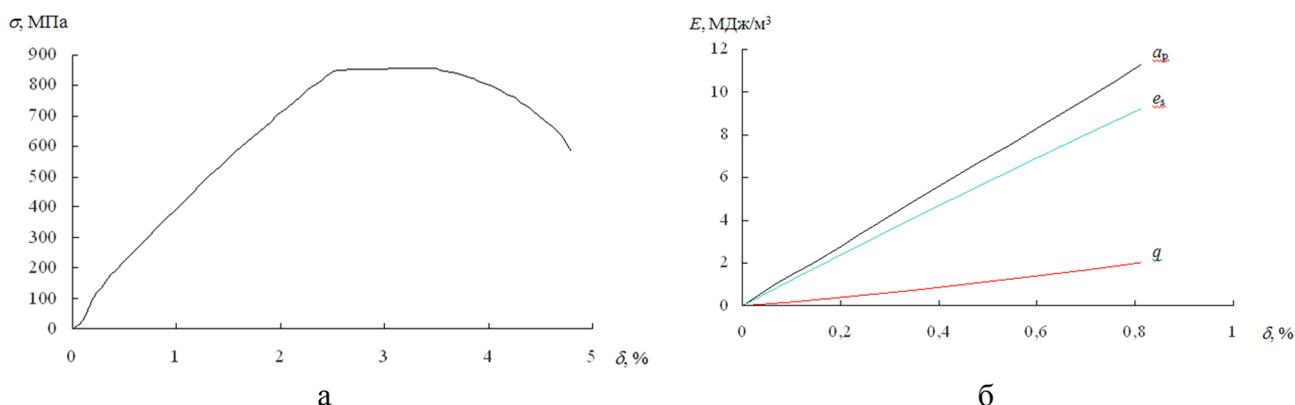


Рисунок 3 – Диаграмма деформирования (а) и зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_s и количества выделившейся теплоты q для упрочненной ТМО стали ВСтЗсп (б).

С увеличением количества циклов нагружения (в рассмотренном интервале циклического нагружения N от 500 до 1500 и значениях максимальной нагрузки цикла $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$) энергетические затраты на стадии деформационного упрочнения возрастают (таблица 2). При этом доля рассеиваемой теплоты с ростом N , как для исходного состояния, так и для упрочненной стали увеличивается (с 21,5% при $N=500$ до 41,2% при $N=1500$ – рисунки 4 и 5).

Увеличение удельной работы пластических деформаций a_p с ростом количества циклов N , по-видимому, связано с расширением интервала деформационного упрочнения $\delta_{сду}$ (таблица 1, рисунки 2 – 5).

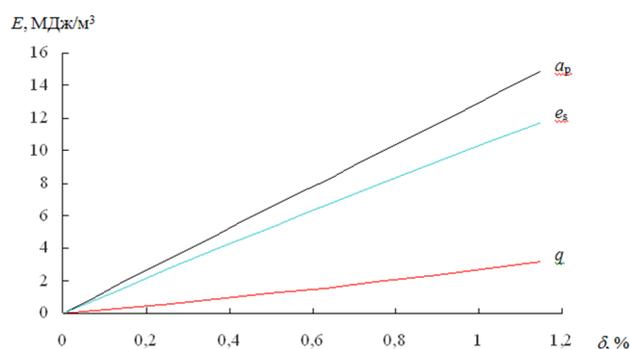


Рисунок 4 – Зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_s и количества выделившейся теплоты q для упрочненной ТМО стали ВСтЗсп после $N=500$ циклов нагружения при $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$

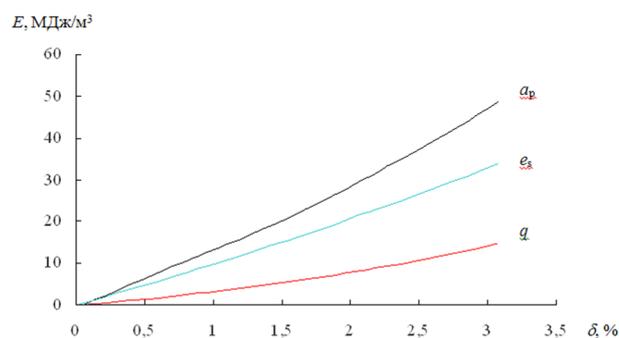


Рисунок 5 – Зависимость удельных значений работы пластической деформации a_p , поглощенной энергии e_s и количества выделившейся теплоты q для упрочненной ТМО стали ВСтЗсп после $N=1500$ циклов нагружения при $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$

На основе проведенных исследований показано влияние циклических нагружений на энергоемкость малоуглеродистой стали ВСтЗсп в состоянии поставки и в упрочненном термомеханической обработкой (закалка + РКУП) состоянии при статическом одноосном растяжении образцов при комнатной температуре.

Выводы:

1. Установлено, что с увеличением количества циклов нагружения (в рассмотренном интервале циклического нагружения N от 500 до 1500 и значениях максимальной нагрузки цикла $\sigma_{\max}=0,8\sigma_T$) энергетические затраты при статическом растяжении образцов из упрочненной стали ВСтЗсп, повышаются, что связано с расширением интервала деформационного упрочнения.

2. Доля энергии, поглощенной при пластическом деформировании на стадии равномерного упрочнения материала, с увеличением количества циклов нагружения уменьшается (с 78,5% при $N = 500$ до 58,8% при $N = 1500$), а доля выделившейся теплоты наоборот увеличивается (с 21,5% при $N=500$ до 41,2% при $N = 1500$). Вероятно, это связано с повышением пластичности деформируемого образца при малоцикловом нагружении.

Результаты исследований влияния малоциклового нагружения стали ВСтЗсп с максимальным напряжением цикла $\sigma_{\max} = 0,8\sigma_T$ позволяют сделать вывод о том, что по изменению работы пластической деформации и выделившейся теплоты при пластической деформации можно судить о поврежденности материала, поскольку эти характеристики связаны с пластичностью, вызываемой движением дислокаций.

Работа выполнена в рамках научного проекта №24.65 по Программе Президиума Российской Академии наук №24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев. – Минск: Наука і тэхніка, 1994. – 231 с.
2. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
3. Ботвина, Л.Р. Особенности статического, ударного и усталостного разрушения стали 06МБФ с субмикроструктурной структурой / Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, В.П. Левин, Ю.А. Демина, И.А. Пантелеев, С.В. Добаткин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Том 74. – № 1. – С. 43–49.
4. Семёнова, И.П. Прочность и повышенные усталостные свойства ультрамелкозернистых титановых прутков, полученных интенсивной пластической деформацией / И.П. Семёнова // Металлы – 2010. – № 5. – С. 87–93.
5. Терентьев, В.Ф. Влияние равноканального углового прессования на усталостную прочность титана и циркониевого сплава / В.Ф. Терентьев, С.В. Добаткин, С.А. Никулин, В.И. Копылов, Д.В. Просвирнин, С.О. Рогачев, И.О. Банных // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 8. – С. 26–33.
6. Рааб, Г.И. Повышение прочности и хладостойкости конструкционных сталей интенсивной пластической деформацией и термической обработкой / Г.И. Рааб, А.М. Иванов, Д.В. Гундеров, П.П. Петров, Е.С. Лукин, Н.Д. Петрова, А.А. Платонов, Р.З. Валиев // Сб. тезисов докладов II Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО–2007» и IV Российско–Белорусского семинара «Наноструктурные материалы–2007» (13–16 марта 2007 г., Новосибирск). – Новосибирск: ИХТТМХ СО РАН. – 2007. – С. 390.
7. Ivanov, A.M. Regularities of deformation and fracture of steels subjected to equal channel angular pressing and thermal processing / A.M. Ivanov, E.S. Lukin, N.D. Petrova // Materials Science Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications. – 2008. – Vols. 584–586. – Pp. 643–648.
8. Плехов, О.А. Исследование усталостного деформирования материалов с использованием метода инфракрасной термографии / О.А. Плехов, С.В. Уваров, Н. Сантье, Т. Пален–Лук, О.Б. Наймарк // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – № 11. – С. 39–43.
9. Ivanov, A.M. Evaluation of storage energy of the constructional steel during plastic deformation / A.M. Ivanov, E.S. Lukin, B.G. Vainer // 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography “QIRT 2006” (June 28–30, 2006. Padova, Italy): Book of Abstracts. – 2006. – Pp. 10–11.
10. Иванов, А.М. Энергетические затраты при деформировании конструкционной стали со структурой, сформированной равноканальным угловым прессованием / А.М. Иванов // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 3. – С. 46–47.
11. Иванов, А.М. Тепловое излучение деформируемых металлических материалов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / А.М. Иванов, Е.С. Лукин // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 6. – С. 39–43.

Иванов Афанасий Михайлович

ФГБУН «Институт физико–технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН», кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Тел.: (4112) 39–05–79
E–mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

Лукин Евгений Саввич

ФГБУН «Институт физико–технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН», кандидат технических наук, старший научный сотрудник
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Тел.: (4112) 39–05–75
E–mail: lukin@iptpn.ysn.ru

A.M. IVANOV, E.S. LUKIN

STRENGTH AND LOW-CYCLE FATIGUE OF STRUCTURAL STEELS SUBJECTED TO SEVERE PLASTIC DEFORMATION

The article discusses the strengthening of mild steel VSt3sp combined effects of quenching and equal channel angular pressing method. The characteristics of strength and ductility of the steel in the state of delivery and hardened steel after cyclic loading are determined. The influence research of low-cycle tests on strength and energy costs during plastic deformation of static tensile specimens of structural and ultrafine grain steels made. Obtained, that the part of storage energy during plastic deformation at the stage of uniform elongation of the material, with the number of load cycles reduced, and the part of released heat increased.

Keywords: steel, strength, plasticity, fatigue, severe plastic deformation, equal channel angular pressure, energy, storage energy, heat.

BIBLIOGRAPHY

1. Segal, V.M. Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov / V.M. Segal, V.I. Reznikov, V.I. Kopylov, D.A. Pavlik, V.F. Malyshev. – Minsk: Navuka i tekhnika, 1994. – 231 s.
2. Valiyev, R.Z. Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / R.Z. Valiyev, I.V. Aleksandrov. – M.: Logos, 2000. – 272 s.
3. Botvina, L.R. Osobennosti staticheskogo, udarnogo i ustalostnogo razrusheniya stali 06MBF s submikrokristallicheskoy strukturoy / L.R. Botvina, M.R. Tyutin, V.P. Levin, YU.A. Demina, I.A. Panteleyev, S.V. Dobatkin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2008. – Tom 74. – № 1. – S. 43–49.
4. Semonova, I.P. Prochnost i povyshennyye ustalostnyye svoystva ultramelkozernistykh titanovykh prutkov, poluchennykh intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / I.P. Semonova // Metally – 2010. – № 5. – S. 87–93.
5. Terentyev, V.F. Vliyaniye ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya na ustalostnyuyu prochnost titana i tsirkoniyevoogo splava / V.F. Terentyev, S.V. Dobatkin, S.A. Nikulin, V.I. Kopylov, D.V. Prosvirnin, S.O. Rogachev, I.O. Bannykh // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2010. – № 8. – S. 26–33.
6. Raab, G.I. Povysheniye prochnosti i khladostoykosti konstruktsionnykh staley intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey i termicheskoy obrabotkoy / G.I. Raab, A.M. Ivanov, D.V. Gunderov, P.P. Petrov, Ye.S. Lukin, N.D. Petrova, A.A. Platonov, R.Z. Valiyev // Sb. tezisov dokladov II Vserossiyskoy konferentsii po nanomaterialam «NANO–2007» i IV Rossiysko–Belorusskogo seminaru «Nanostrukturnyye materialy–2007» (13–16 marta 2007 g., Novosibirsk). – Novosibirsk: IKHTTMKH SO RAN. – 2007. – S. 390.
7. Ivanov, A.M. Regularities of deformation and fracture of steels subjected to equal channel angular pressing and thermal processing / A.M. Ivanov, E.S. Lukin, N.D. Petrova // Materials Science Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications. – 2008. – Vols. 584–586. – Pp. 643–648.
8. Plekhov, O.A. Issledovaniye ustalostnogo deformirovaniya materialov s ispolzovaniyem metoda infrakrasnoy termografii / O.A. Plekhov, S.V. Uvarov, N. Santye, T. Palen–Luk, O.B. Naymark // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2005. – № 11. – S. 39–43.
9. Ivanov, A.M. Evaluation of storage energy of the constructional steel during plastic deformation / A.M. Ivanov, E.S. Lukin, B.G. Vainer // 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography “QIRT 2006” (June 28–30, 2006. Padova, Italy): Book of Abstracts. – 2006. – Pp. 10–11.
10. Ivanov, A.M. Energeticheskiye zatraty pri deformirovanii konstruktsionnoy stali so strukturoy, sformirovannoy ravnokanalnym uglovyim pressovaniyem / A.M. Ivanov // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2008. – № 3. – S. 46–47.
11. Ivanov, A.M. Teplovoye izlucheniye deformiruyemykh metallicheskikh materialov, podvergnutykh intensivnoy plasticheskoy deformatsii / A.M. Ivanov, Ye.S. Lukin // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2008. – № 6. – S. 39–43.

Ivanov Afanasiy Mikhailovich

Ph.D., Leading Researcher of the V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk.
Ph.: (4112) 39–05–79
E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

Lukin Evgeny Savvich

Ph.D., Senior Researcher of the V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk.
Ph.: (4112) 39–05–75
E-mail: lukin@iptpn.ysn.ru

Г.В. ЗИБРОВ, В.Н. СТАРОВ, Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, А.В. ПОПОВ

СТРУКТУРА И ВЫБОР ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Представлены особенности создания технологий нового поколения, к которым отнесены комбинированные методы обработки и неразрушающие методы диагностики с применением акустико–эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов.

Ключевые слова: *новые технологии, технологическая наследственность, комбинированные методы обработки, неразрушающие методы диагностики, акустическая эмиссия.*

Для эксплуатации силовых элементов ответственных конструкций изделий специального машиностроения актуальным вопросом является оценка их прочностных характеристик исходя из степени опасности дефектов и учет технологической наследственности объекта (ТНО) на этапах жизненного цикла продукции (ЖЦИ). В этих условиях важно учитывать изначальные физические воздействия, заложенные в объект ещё при его проектировании, а также технологические воздействия процессов изготовления, особенно базирующихся на современных высокоэффективных комбинированных методах обработки (КМО).

В данном случае речь идет о достижениях и возможностях научно–технического прогресса, в том числе, при применении в сфере производства новых технологий создания, диагностики и контроля объектов сложных и специальных производств (ракетно–космические системы и их двигатели, ядерные, энергетические объекты и реакторы, энергетические турбины, системы перекачки и переработки нефти, газа и другие).

Цель работы – исследовать механизмы реализаций физических воздействий и учета прочностных характеристик конструкций ответственного назначения, исходя из современных требований к качеству продукции, высокой конкуренции на рынках и внедрения в производство и эксплуатацию прогрессивных технологий.

Известна работа [1], где исследована общая методология создания технологий нового поколения, к которым мы также относим комбинированные методы обработки и неразрушающие методы диагностики с применением акустико–эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов (АЭКИ), позволяющие оценивать прочностные характеристики ответственных конструкций с учётом степени опасности дефектов вне зависимости от их формы, размеров и предыстории эксплуатации [6, 7].

Процесс создания любой прогрессивной технологии является сложной проблемой, которая базируется на начальных условиях, задаваемых при проектировании и определяющих направления развития технологий. При этом начальные условия основываются на следующем:

- на принятой общей идеологии, концепциях, принципах;
- на используемых методологии и системах описания объекта проектирования и конструкторского обеспечения;
- на определении целей, задач, систем принятия решений по объектам;
- на определении, выборе и описании технологического обеспечения производства изделия, начиная от технологической подготовки производства с выбором заготовок с заданными свойствами и уровнями контроля;
- на базовых этапах преобразования заготовок–деталей в готовое изделие с требуемыми свойствами (качеством);
- на определении, выборе и описании полного технологического обеспечения со всеми средствами контроля и многом другом.

Укажем, что целями создания подобных технологий являются:

- достижение требуемых показателей качества объекта или технического обеспечения и выпускаемых изделий;
- удовлетворение требованиям высокой работоспособности и повышенных эксплуатационных показателей изделия;
- снижение ресурсопотребления, как производства, так и созданной на нем продукции, в том числе, энергетической направленности;
- обеспечение требуемого алгоритма функционирования или технологических воздействий на заготовки при их превращении в детали;
- создание конкурентоспособной продукции на национальном или глобальном уровнях и приемлемых цен изделий;
- удовлетворение требованиям к дальнейшему развитию, модернизации и перспективности объекта, а также прочие.

Считается, что признанного единого решения уравнений математического описания объекта производства для подавляющего числа комбинированных методов обработки и контроля до сих пор не найдено. Исключениями являются лишь несколько хорошо изученных и давно применяемых в производстве способов [3]. Таким образом, механизмы реализации при комбинации различных воздействий на объекты обработки и неразрушающего контроля либо не изучены, либо существуют только для частных случаев [3, 4].

Описание многих процессов можно выполнять на базе формализованных подходов. Однако не все конструкторские и технологические идеи и обеспечения процессов можно формализовать, поэтому в ряде случаев требуется параллельное рассмотрение значительного числа разнонаправленных задач или подзадач. В этом случае принято использовать специальное математическое и программное компьютерное обеспечение из области САПР, хотя процесс построения САПР технологических процессов комбинированных методов обработки до сих пор слабо реализован и охватывает лишь частные вопросы, что не позволяет широко и эффективно их использовать.

Идея концепции жизненного цикла товара была предложена в 1965 г. Т. Левиттом. В этом понимании товар, попав на рынок, живет своей особой товарной жизнью, называемой в маркетинге жизненный цикл товара.

У различных товаров разный жизненный цикл. Он может длиться от нескольких дней до десятков лет. Любые технические системы, вступая в строй, предназначены выполнять поставленные задачи. С этой стороны их жизненный цикл определяется периодом эксплуатации. В дальнейшем будем говорить о сложных технологических объектах, особенностях их работы, эксплуатации, обеспечения повышенной или ранее не достижимой работоспособности на этапах жизненного цикла изделия.

При исследованиях работоспособности ответственных конструкций машиностроения были [5] предложены некоторые поправки в методические основы, понятия «жизненный цикл продукции», включают этапы – стадий жизни, на каждом из которых производится оценка и обеспечивается качество. Этапы следующие: маркетинг, поиск и изучение рынка (МР); проектирование и разработка требований продукции (РТП); материально – техническое снабжение, (МТС) обеспечение; технологическая подготовка производственных процессов с учетом технологической наследственности (ТПП–ТНО–КМО); производство продукции с учетом технологической наследственности (ПР–ТНО); диагностика (контроль); проведение испытаний и обследований (ДИ–АЭКИ); упаковка и хранение (УХ); реализация и распределение продукции (РР); монтаж и эксплуатация (МЭ); техническая помощь и обслуживание, сервис (ТС); утилизация (УТ).

С учетом современных требований к качеству продукции, высокой конкуренции на рынках, прогрессивные технологии должны иметь итерационный характер выполнения всех их стадий.

По традиционной схеме обратная связь отсутствует, что для комбинированных методов является неприемлемым. Кроме того, такая схема не позволяет выполнять

отдельные этапы параллельно, а не последовательно, внедряя современные информационные технологии, например, CALS–технологии. Известные упрощенные схемы, позволяющие проводить итеративное проектирование, в некоторой степени лишены недостатков традиционного способа, при этом с точки зрения оптимальности их последовательность может быть изменена.

Схема с направленными шагами через анализ, признана нами оптимальной для разработки методики проектирования новых технологий с использованием комбинированных методов обработки и систем диагностики (контроля) АЭКИ.

Существует предложенная авторами работы [4] гипотетическая диаграмма проектирования технологии нового поколения. Она основывается на определении системы принципов и методов обеспечения качественно новых свойств и возможностей технологий, а также на разработке системы проектирования новой технологии.

Последняя должна обеспечивать возможность эффективного использования на этапах ЖЦИ наукоемких процессов, в нашем случае это новая технологическая подготовка производственных процессов с учетом технологической наследственности (ТПП–ТНО); собственно КМО; производство продукции с учетом технологической наследственности (ПР–ТНО); диагностика (контроль), проведение испытаний и обследований (ДИ–АЭКИ).

Принципы проектирования новой технологии основаны на широком компьютерном обеспечении, они позволяют обрабатывать, накапливать и рационально использовать постоянно пополняемые базы данных.

Система принципов и методов обеспечения качественно новых свойств и возможностей базируется на композициях множеств известных и новых принципов и методов обеспечения свойств и возможностей технологии.

Проведение анализа показывает, что важнейшим является анализ и синтез объектов систем. С учетом представлений, приведенных в работе [4], исследуем общее описание алгоритма синтеза методов обработки и диагностики, имея в виду, что есть два базовых вектора – комбинированная обработка КМО и методы диагностики, с применением акустико–эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов АЭКИ [6,7].

1. Во–первых, создается открытый набор единичных процессов с базовой основой в качестве КМО и АЭКИ, обеспечивающих заданное изменение свойств объекта обработки и своевременную оценку состояния элементов или объектов изделия. В нашем случае речь идет о процессах формирования требуемого объекта какими–то методами обработки, приводящие к управляемому локальному и дозированному разрушению (созданию) формы и поверхности твердого тела с целью изменения его макро– и микро размеров и свойств поверхности (поверхностно–приповерхностного слоёв). Причем эта база является открытой, то есть при необходимости может расширяться, и включать в себя новые элементы и новые возможности.

Также учитываются, а при необходимости создаются системы ограничений, основанные учете особенностей используемых принципов, причем учитывают неприемлемые отношения между парциальными процессами, свойствами этих процессов и возможные результаты.

2. Далее, для данного класса технологических задач формируются функция (F) цели. Так, при синтезе комбинированных методов отделочно–упрочняющей обработки поверхностей деталей машин функция цели может быть представлена выражением вида

$$F = f(R, \alpha, \beta, \tau, \gamma, q) = A(x)A(y)B, \quad (1)$$

где R, α – обобщенные характеристики микро– и макрогеометрии поверхности,

τ , – обобщенные показатели напряженного состояния;

β – показатели металло–физических свойств поверхно– приповерхностного слоев;

γ – показатель прочности связи поверхностного слоя с основой;

q – показатель, отражающий особенности формирования (разрушения) поверхностного (обрабатываемого) слоя;

A – множество воздействий, отражающих структуру процесса КМО;

$\Delta(x)$ – оператор выбора необходимой структуры методов обработки;

$\Delta(y)$ – оператор выбора необходимой структуры диагностики;

B – множество отражающее структуру процесса диагностики с использованием АЭКИ.

3. Средствами комбинаторики выявляется множество для процессов обработки K и диагностики D в виде возможных сочетаний единичных процессов или их обобщенных представителей.

4. Осуществляется формирование подмножества методов обработки, элементы которых удовлетворяют принятым ранее ограничениям: $K^* \in K$.

5. Осуществляется формирование подмножества D^* методов диагностики, элементы которых удовлетворяют принятым ранее ограничениям, т. е. $D^* \in D$.

6. Разрабатываются способы реализации конкретного метода обработки $K_i \in K$ и технологии на основе этих способов.

7. Разрабатываются способы реализации конкретного метода диагностики $D^* \in D$ и технологии (в данном случае АЭКИ) на основе этих способов.

8. Выполняется экспериментальная оценка эффективности таких технологий, делается заключение о целесообразности использования данного метода обработки и диагностики в конкретной области техники (предметной области), выявляется подобласть его эффективного применения, оцениваются диапазоны достигаемых этими методами технологические (эксплуатационные) результаты.

Таким образом, можно уверенно констатировать, что большую научную ценность при исследовании и разработке, как комбинированных методов обработки, так и диагностики, представляют данные об отношениях между парциальными процессами. Они проявляются через специфические эффекты взаимовлияния, для обработки такие как механохимический, термохимический, механоэлектрический и другие процессы.

Для неразрушающих методов диагностики это применение акустико-эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов (АЭКИ), которые позволяют оценивать прочностные характеристики конструкций с учётом степени опасности дефектов вне зависимости от их формы, размеров и предыстории эксплуатации.

Указанные эффекты взаимовлияния лежат в основе синергических, компенсационных, фильтрационных и иных явлений, свойственных методам комбинированными методами формирования поверхностей и диагностики состояния объекта, представляющих технологический интерес и обеспечивающих конкурентоспособность соответствующих технологий и произведенных с их помощью изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов // Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Хубка, В. Теория технических систем / В. Хубка // М.: Мир, 1987. – 208 с.
3. Смоленцев, В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч. 1: Обработка материалов с применением инструмента / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев // Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008 – 248 с.
4. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа, 2002. – 656 с.
5. Старов, В.Н. Моделирование процессов изменения работоспособности оборудования с учетом технологической наследственности. Монография / В.Н. Старов М.Н. Краснова // Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 140 с.
6. Попов, А.В. Метод функциональных инвариантов в задачах оценки прочности на основе акустической эмиссии / А.В. Попов // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 23–27.
7. Попов, А.В. Метод регистрации акустико-эмиссионных сигналов и силовых элементах конструкций вооружения и военной техники на основе лазерного голографического интерферометра / А.В. Попов, В.Н. Старов, Д.Е. Барабаш, С.Ю. Жачкин // Вестник ВАИУ № 1 (15). Научное периодическое издание. Воронеж. ВАИУ. – 2012. – С. 18–28.

Зибров Геннадий Васильевич
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,
г. Воронеж
Доктор педагогических наук, начальник
Военно – воздушной академии
Тел.: 8(473)2369018

Смоленцев Евгений Владиславович
ФГБОУ ВПО «ВГТУ», г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
Тел.: 8–4732348145
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Старов Виталий Николаевич
ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС Рос-
сии, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
E-mail: vigps_onirio@mail.ru

Попов Алексей Владимирович
ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.
Гагарина», г. Воронеж
Доктор технических наук, доцент
Тел.: 8(473)2369018

G.V. ZIBROV, V.N. STAROV, E.V. SMOLENTSEV, A.V. POPOV

STRUCTURE AND SELECTION PHYSICAL IMPACT MANAGEMENT STRENGTH CHARACTERISTICS CRITICAL STRUCTURES

This article shows features of creation of new generation technologies, which include combined methods of treatment and non-destructive methods of diagnosis using acoustic emission criteria destruction-based invariants.

Keywords: *new technologies, technological heredity, combined methods of treatment, non-destructive diagnostic techniques, acoustic emission.*

BIBLIOGRAPHY

1. Mikhaylov, A.N. Osnovy sinteza funktsionalno-oriyentirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya / A.N. Mikhaylov // Donetsk: DonNTU, 2009. – 346 s.
2. Khubka, V. Teoriya tekhnicheskikh sistem / V. Khubka // M.: Mir, 1987. – 208 s.
3. Smolentsev, V.P. Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki. Ch. 1: Obrabotka materialov s primeneniym instrumenta / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, Ye.V. Smolentsev, G.P. Smolentsev, I.T. Koptev // Voronezh: GOUVPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2008 – 248 s.
4. Fiziko-khimicheskiye metody obrabotki v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley / Pod red. B.P. Sashkina // M.: Drofa, 2002. – 656 s.
5. Starov, V.N. Modelirovaniye protsessov izmeneniya rabotosposobnosti oborudovaniya s uchetoм tekhnologicheskoy nasledstvennosti. Monografiya / V.N. Starov M.N. Krasnova // Voronezh: GOUVPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2010. – 140 s.
6. Popov, A.V. Metod funktsionalnykh invariantov v zadachakh otsenki prochnosti na osnove akusticheskoy emissii / A.V. Popov // Defektoskopiya. – 2008. – № 2. – S. 23–27.
7. Popov, A.V. Metod registratsii akustiko-emissionnykh signalov i silovykh elementakh konstruktсий vooru-zheniya i voyennoy tekhniki na osnove lazernogo golograficheskogo interferometra / A.V. Popov, V.N. Starov, D.Ye. Barabash, S.Yu. Zhachkin // Vestnik VAIU № 1 (15). Nauchnoye periodicheskoye izdaniye. Voronezh. VAIU. – 2012. – S. 18–28.

Zibrov Gennady Vasilievich
Military Training and Research Center
Air Force «Air Force Academy named after Professor
Zhukovsky and Yuri Gagarin», Voronezh
Doctor of Education, Head of the Military – Air Force
Academy
Ph.: 8 (473) 2369018

Smolentsev Evgeniy Vladislavovich
VPO «VSTU» Voronezh
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ph.: 8–4732348145
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Starov Vitaly Nikolaevich
VPO Voronezh Institute of GPS MES of Russia, Voronezh
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: vigps_onirio@mail.ru

Popov Alexey vladimirovich
VUNTS Air Force «BBA them. Prof. N.E. Zhukovsky and
Yu.A. Gagarin», Voronezh
Ph.D., Associate Professor
Ph.: 8 (473) 2369018

В.И. ВОРОБЬЕВ, О.В. ИЗМЕРОВ, М.И. БОРЗЕНКОВ, В.С. АВДАЩЕНКО, В.О. КОРЧАГИН

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА

Рассмотрена задача синтеза технического решения тягового привода локомотива с минимальными потерями энергии в системе «колесно–моторный блок–рельс» путем воздействия на контакт колеса и рельса электрического тока и магнитного поля. Определены требования к схеме такого привода и предложен практически реализуемый вариант такой схемы.

Ключевые слова: *проблемы создания новой техники, теория знаний, синтез технических решений, тяговый привод подвижного состава железных дорог, сцепление колеса с рельсом, энергосберегающие технологии.*

Основную часть потерь энергии в механической части тягового привода железнодорожного локомотива (далее – тягового привода) составляют потери вследствие скольжения колеса по рельсу, которые можно снизить путем внешнего воздействия на контакт колеса и рельса электрического тока или магнитного поля на основе прогноза физических свойств системы в точке контакта колеса и рельса [1]. Рассмотрим, как это может повлиять на процесс синтеза технических решений тягового привода.

Необходимые изменения в механической части локомотива, связанные с применением устройств для повышения сцепных свойств локомотива с помощью электрического тока, описаны в [2]. Определим новые требования к тяговому приводу при использовании магнитных усилителей коэффициентов сцепления локомотива (МУКС) путем поиска рациональных конструктивных схем (создание классификации конструкций МУКС в виде схематизированного алгоритма перехода от базовых физических свойств узла к его конкретным конструкциям [3], анализ противоречий в требованиях к МУКС для каждой из конструктивных схем, выявление противоположных свойств узла, вызвавших указанные противоречия [4], формулировка технической идеи и возможных способов ее реализации.)

Предлагаемая классификация технических решений МУКС (рисунок 1) имеет четыре уровня. На первом уровне МУКС предлагается различать по особенностям физики действия на МУКС с магнитной системой, которая близка к замкнутой, в которой геометрические размеры воздушного зазора невелики по сравнению с размерами ферромагнитных элементов, и разомкнутой, в которой магнитный поток проходит в основном по воздуху. На втором уровне в качестве классификационного признака предложены особенности геометрии МУКС, т.е. расположение индуктора по отношению к колесу (на колесе, вне колеса, на оси колесной пары, на путевой структуре). Третий уровень – это группировка МУКС по их конструктивным схемам, соответствующим геометрии их компоновки, а четвертый – примеры технических исполнений для каждой из схем. Разомкнутой магнитной системе при размещении индуктора на оси соответствует схема с компоновкой обмоток МУКС вдоль оси [19], при размещении на колесе – хордовое размещение индуктора, который может быть подвешен к необрессоренным массам тележки [5], или к обрессоренным (локомотив ТЭМ2УС), вне колеса – в межосевом пространстве, например [6,7], индуктор также может быть расположен как на необрессоренных, так и на обрессоренных массах экипажа, на пути – продольное расположение [16]. Замкнутая схема магнитопровода индуктора и размещение его в колесе приводит к необходимости применять разрезное колесо с расположенными внутри секторными обмотками индуктора [8], дуговыми [17], либо с внешним индуктором, расположенным с торца колеса, обод которого разделен немагнитной вставкой [9]. При расположении индуктора вне колеса компоновка индуктора на экипажной части аналогична индуктору с разомкнутой магнитной системой [10]. Расположение индуктора на пути требует применения разрезного рельса [18].

Рассмотрим противоречия к требованиям для МУКС. При расположении обмотки индуктора вдоль оси колесной пары основным противоречием является то, что при использова-

нии в качестве сердечника индуктора оси колесной пары для увеличения магнитного потока и эффективности МУКС, радиальные габариты обмотки должны быть по возможности больше, а для размещения электродвигателя тягового привода – по возможности меньше, т.к. обмотка расположена между осью и корпусом электродвигателя. Располагать индуктор с отдельным сердечником параллельно оси колесной пары в этом случае нецелесообразно, т.к. возникают два дополнительных зазора между полюсами индуктора и дисками колес, а ось шунтирует магнитный поток, снижая напряженность поля в точках контакта колес с рельсом.

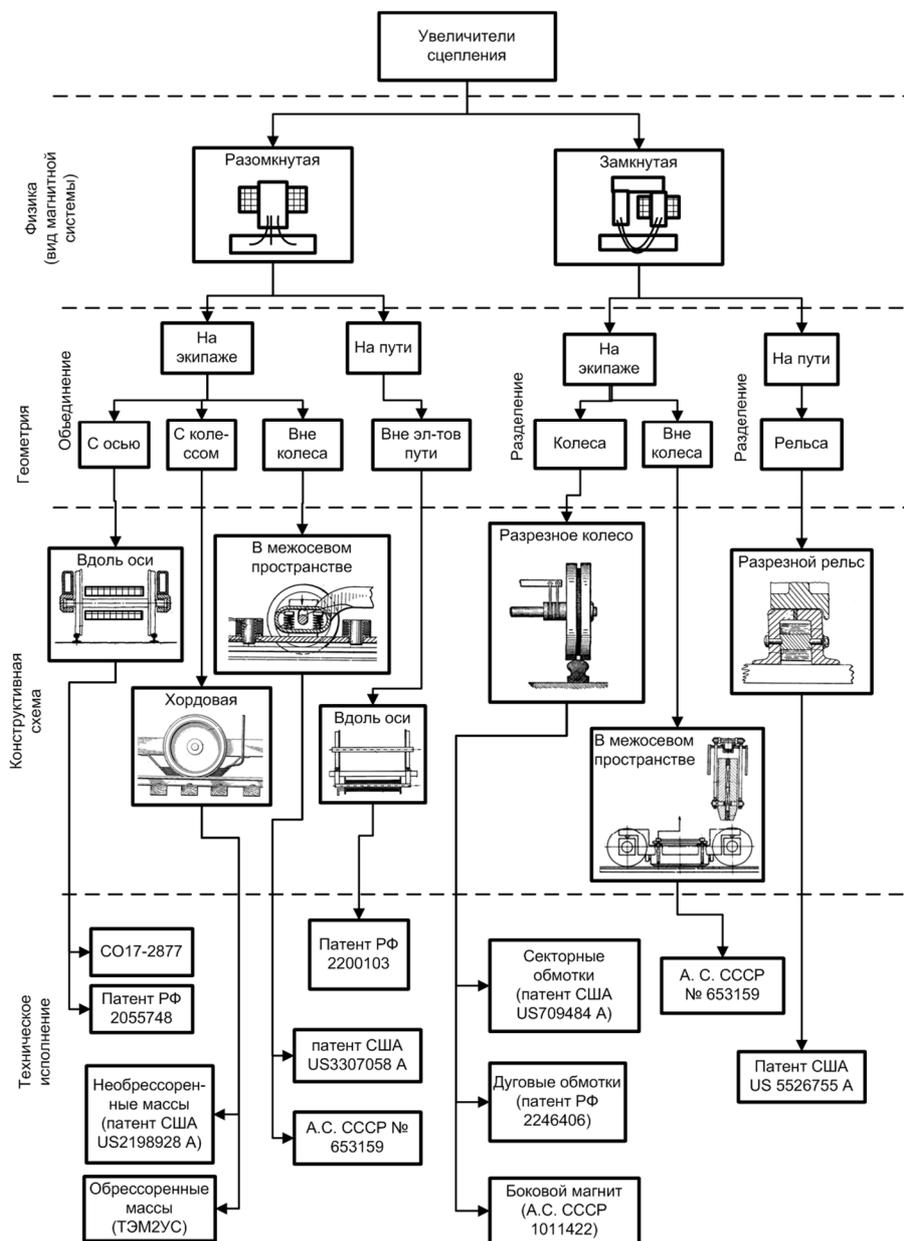


Рисунок 1 – Классификация технических решений увеличителей сцепления

При расположении обмотки индуктора вокруг колеса по его хорде возникают противоречия двух видов. Во-первых, это противоречия между размерами обмотки индуктора и ограничениями со стороны пути и других деталей экипажной части. Во-вторых, это противоречия между необходимостью уменьшить воздушный зазор между обмоткой индуктора, рельсом и колесом, и необходимостью увеличивать воздушный зазор для обеспечения вертикального и поперечного перемещения колесной пары. Эти противоречия не были разрешены при создании МУКС для тепловоза ТЭМ2УС, в результате чего предельная сила тяги при испытаниях возросла лишь на несколько процентов [11]. Крепление индуктора на необрессоренных массах локомотива, развивающего на ж.д. путях общего назначения скорость 100

км/ч и выше, приводит к воздействию на индуктор высоких ускорений при проезде неровностей пути, что противоречит требованиям к механической прочности и надежности работы обмотки индуктора. Другое противоречие для хордовой компоновки индуктора заключается в том, что магнитный поток, создаваемый хордовой обмоткой, должен быть как можно больше для увеличения сцепления, и в то же время должен быть как можно меньше, для снижения сопротивления движению, вызванного появлением вихревых токов в колесе при его вращении в магнитном поле, созданном обмоткой.

Расположение индуктора между колесными парами позволяет ослабить противоречия, обусловленные внешним ограничением габаритов, однако при креплении такого индуктора на обрессоренных массах экипажа его эффективность снижается по причине необходимости обеспечить зазор между индуктором и рельсом порядка нескольких десятков миллиметров. При креплении индуктора к необрессоренным массам возникают те же проблемы, что и для описанных выше индукторов с расположением обмотки по хорде колеса. То же относится и к МУКС с замкнутой магнитной системой индуктора при размещении между колесными парами. В настоящее время в [12] обосновано применение подобных МУКС для шахтных локомотивов в режиме торможения, с опусканием индуктора на рельс, как альтернатива электромагнитным рельсовым тормозам.

При расположении индуктора в самом колесе возникает противоречие: «колесо должно быть разрезным, чтобы значительная часть магнитного потока проходила через контакт колеса и рельса, и должно быть цельным, чтобы не было существенных различий в механических и, в частности, прочностных свойствах магнитной и немагнитной части колеса». Учитывая общую тенденцию создания мотор–колес для низкопольного моторвагонного подвижного состава, нельзя отбрасывать возможность размещения индуктора в колесе.

На основании изложенного определены следующие требования к МУКС:

- в индукторе не должно быть деталей магнитопровода, имеющих большой вес и материалоемкость (магнитопроводом должны служить детали экипажной части);
- необходимо обеспечить достаточное пространство для обмотки индуктора;
- между магнитопроводом и колесом не должно быть значительного промежуточного воздушного зазора, снижающего эффективность индуктора;
- потери энергии от создаваемых магнитным полем вихревых токов должны быть существенно меньше экономии энергии за счет исключения боксования.

Указанным требованиям в наибольшей степени отвечает компоновка МУКС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары.

Для анализа влияния этих требований на выбор схемы тягового привода локомотива (индивидуальным или групповой) использован метод анализа логики решений путем реинвентирования [13]. Согласно периодизации [13], проблема выбора между индивидуальным и групповым приводом характерна для начала этапа потребности в серийном производстве новых видов локомотивов, этапа реконструкции тяги и нынешнего этапа поиска инновационных решений тяговых приводов.

На этапе начала серийного производства тепловозов и электровозов необходимость использовать базу паровозного производства определила конструктивную схему в виде параллельно–кривошипного привода [13]. Недостатком привода было ограничение числа сцепных осей в жесткой раме и сцепного веса, соответственно и силы тяги, в связи с чем конструкторы пошли по пути предельного упрощения индивидуального привода.

На этапе реконструкции тяги и массового выпуска тепловозов и электровозов групповой привод за счет улучшения сцепных свойств при механическом спаривании осей давал возможность снизить расход материалов и энергии в производстве и экономить энергии в эксплуатации, за счет снижения веса локомотива и опорно–рамного подвешивания тяговых электродвигателей (ТЭД). При уровне технологий того времени для группового привода был выявлен ряд проблем (ограничение мощности коллекторного ТЭД, рост стоимости изготовления тяговых передач и передаточных механизмов, рост потерь энергии в многоступенчатых передачах из–за невысокого качества изготовления и более высокие динамические

нагрузки, чем в индивидуальном, при боксовании [4]). Альтернативой групповому приводу в этот период было совершенствование индивидуального.

Предполагалось заменить механическое спаривание осей электрическим посредством использования асинхронных ТЭД с питанием от общей шины, устойчивых к ударным и вибрационным нагрузкам. Реализация этого пути к нашему времени выявила ряд новых факторов.

Во-первых, при питании от общей шины для снижения разброса токов между ТЭД параметр относительного скольжения увеличивается 0,04–0,06 в номинальном режиме [14], отчего растут потери в обмотке ротора. В связи с этим на современных электровозах вместо общей шины каждый асинхронный ТЭД питают от отдельного, самостоятельно регулируемого преобразователя частоты, снижая для защиты от боксования заданную силу тяги. При определении боксования по снижению фактической мощности ТЭД в сравнении с заданной [15], к.п.д. пары «колесо–рельс» снижается на величину относительного скольжения, при котором снижение мощности становится заметным, при этом снижается общая сила тяги. При механическом же спаривании осей, ухудшение сцепления одной из колесных пар ведет к перераспределению тяговой нагрузки на остальные колесные пары вплоть до срыва в боксование всеми колесами.

Во-вторых, в эксплуатируемых локомотивах с бесколлекторными ТЭД простая одноступенчатая передача в индивидуальном приводе не позволяет полностью реализовать возможности снижения массы за счет повышения окружной скорости ротора, максимальная частота вращения ТЭД на практике часто ограничивается примерно 2000 об/мин. В групповом приводе многоступенчатый редуктор позволяет приводить две колесные пары тележки одним ТЭД тех же габаритов и массы, что и при индивидуальном за счет повышения частоты вращения ротора до 4000 об/мин, при этом многопоточность быстроходной ступени упрощает решение проблемы надежности подшипников при высоком числе оборотов.

В-третьих, стоимость электровозов с асинхронными ТЭД значительно выше, чем коллекторных за счет стоимости преобразовательного оборудования, и рост стоимости группового привода за счет усложнения тяговой передачи перестает играть решающую роль.

На современном этапе поиска инновационных решений тяговых приводов основной становится проблема надсистемы – снижение потерь энергии при боксовании с помощью увеличителей сцепления (УС), использующих воздействие тока и магнитного поля [1].

При групповом приводе нетрудно реализовать воздействие на контакт «колесо–рельс» электрического тока без замыкания его через тележку, поскольку узел колесной пары с буксами может быть без особых трудностей электрически изолирован от других узлов с помощью резиновых втулок поводков букс и резиновых элементов передаточных механизмов. Осевые редукторы изолированы резиновыми элементами подвесок. При индивидуальном приводе колесная пара может быть легко изолирована от тележки только при опорно–рамном подвешивании ТЭД, при опорно–осевом приводе требуется изоляция моторно–осевых подшипников. При размещении на тележке индуктора для воздействия на систему «колесо–рельс» магнитного поля, групповой привод, у которого двигатель удален от колесных пар, позволяет разместить обмотки индуктора на оси колесной пары, подобно тому, как это в порядке эксперимента делали на паровозах. В индивидуальном приводе для размещения обмотки индуктора усилителя сцепления на оси необходимо вводить в тяговую передачу промежуточные колеса или делать ее двухступенчатой. При этом теряется основное преимущество индивидуального тягового привода над групповым – простота конструкции. Динамические же нагрузки в индивидуальном и групповом приводе в этом случае не различаются, т.к. усилители сцепления исключают режим боксования.

Применение средств усиления коэффициентов сцепления требует перехода от противобоксовочных систем, устраняющих уже начавшееся боксование путем измерения электрических или механических параметров ТЭД [20, 21], а путем прогнозирования изменения сцепных свойств за счет естественных факторов [1], что возможно сделать, например, путем измерения температуры в точке контакта тепловизором, анализа продольных ускорений бук-

сы или непосредственным измерением силы трения колеса по рельсу. Групповой привод создает в этом плане следующие дополнительные преимущества:

– наличие механического спаривания осей сокращает число объектов системы управления, для которых необходимо прогнозировать свойства системы «колесо–рельс», что упрощает создание системы управления;

– спаривание осей в двухосных тележек позволяет одновременно воздействовать на систему «колесо–рельс» с помощью электрического тока и МУКС, при этом используя воздействие электрического тока для одновременного повышения коэффициента сцепления обеих колесных пар, предупреждая срыв в боксование всей тележки путем пропуска тока через замкнутую цепь, в которую входят колесные пары тележки, а с помощью МУКС производить выравнивание сцепных свойств колесных пар в пределах одной тележки;

– использовать для прогнозирования сцепных свойств различие в крутящих моментах на колесных парах в режиме тяги и торможения, возникающее вследствие разности относительного скольжения колесных пар при различии условий сцепления.

Результаты анализа логики выбора решения представлены в виде схемы на рисунке 2.

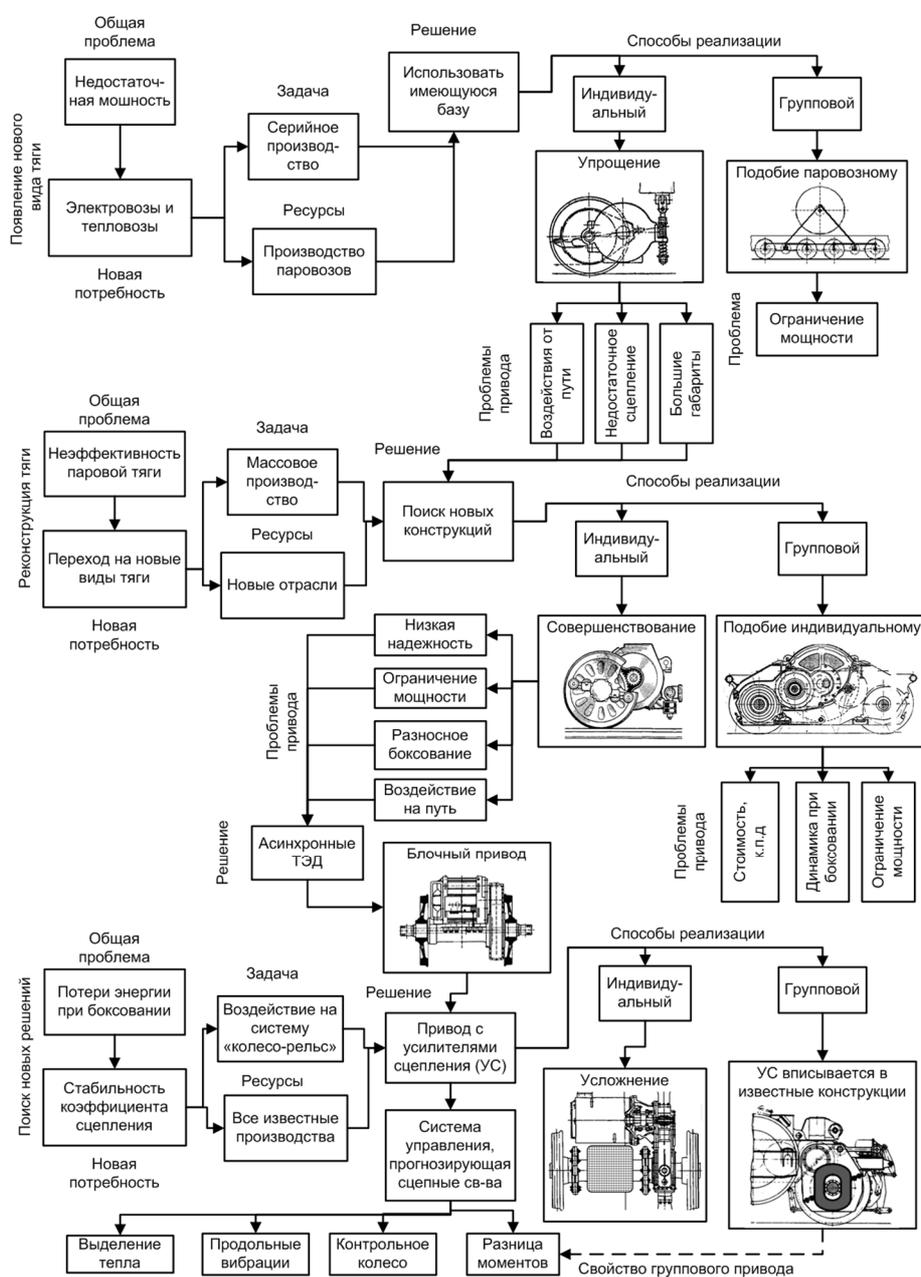


Рисунок 2 – Схема модели рационального выбора между групповым и индивидуальным тяговым приводом локомотива на разных стадиях развития

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

– решение задачи снижения потерь энергии в тяговом приводе локомотива при боксовании путем воздействия на систему «колесо–рельс» электрического тока и магнитного поля в перспективе окажет существенное влияние на конструктивные схемы тяговых приводов вследствие необходимости изоляции колесных пар от тележки, размещения на экипажной части индукторов достаточного размера и использования в качестве магнитопроводов массивных деталей экипажной части;

– имеет смысл вернуться к исследованиям технико–экономических характеристик групповых тяговых приводов локомотивов, с учетом того обстоятельства, что групповые тяговые приводы дают больше возможностей для размещения на экипажной части локомотива устройств, усиливающих сцепление путем воздействия электрического тока и магнитного поля, а механическое сочленение колесных пар в тележке, обеспечивая перераспределение тяговых усилий в соответствии с условиями сцепления колесных пар упрощает создание противобоксовочной системы, т.к. прогнозировать изменение сцепных свойств достаточно для тележки в целом, а не для каждой колесной пары в отдельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев, А.А. Снижение потерь энергии путем оптимизации противобоксовочных устройств в системе «колесо–рельс». Доклад на XI Международной научно–практической интернет–конференции «Энерго– и ресурсосбережение – XXI век», А.А. Пугачев, О.В. Измеров, С.Г. Волохов. – ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – Орел, 2013.
2. Тихомиров, В.П. Моделирование сцепления колеса с рельсом: монография / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, Д.В. Воробьев, Г.В. Багров, М.И. Борзенков, И.А. Бутрин. – Орел: ОрелГТУ, 2007. – 127 с.
3. Измеров, О.В. Классификация как инструмент синтеза механической части тяговых приводов железнодорожного подвижного состава: статья. / О.В. Измеров, Г.С. Михальченко. – «Мир транспорта и технологических машин». – 2012. – №4 (39). – С. 53–60.
4. Техническая инновационика. Проектирование конкурентоспособных машин: монография / О.В. Измеров; под ред. чл.–кор. Академии электротехн. наук РФ, д–ра техн. наук, проф. А. С. Космодамианского. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. – 415 с.
5. Wehner David E. Electromagnetic traction increaser. Pat. US2198928 A, 2.12.1936.
6. Karel Kucera. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives. Pat. US3307058 A 20.01.1964.
7. А.с. 1286453 СССР, МПК В61С15/04. Магнитный догрузатель рельсового транспортного средства / Мишин В.В., Зябрев В.А., Лебедев А.И., Салов В.А. Шляхов Э.М. (СССР). – 3803110/31–11; заявлено 16.10.84; опубл. 30.01.87, Бюл. 4. – 3 с.
8. John Otto Heinze Jr. Magnetic wheel. Pat. US709484 A, 24.02.1902.
9. А.с. 1011422 СССР, МПК В61С15/04. Устройство для увеличения давления колес транспортного средства на рельсы / Салов В.Л. (СССР). – 3253205/27–11; заявлено 18.02.81; опубл. 15.04.83, Бюл. 14. – 3 с.
10. А.с. 1113296 СССР, МПК В61С15/04. Устройство для увеличения нагрузки на оси рельсового транспортного средства / Салов В.Л., Шацкин В.Б., Дорожкин В.Н. (СССР). – 3600604/27–11; заявлено 03.06.83; опубл. 15.09.84, Бюл. 34. – 3 с.
11. Ситников, Е.А. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей / Е.А. Ситников, И.Н. Родионов, В.П. Гриневиц // Отчет ВНИТИ № И–108–82. Коломна, 1982. – 83 с.
12. Проців, В.В. Переваги магнорейкового довантажувача над рейковим галмом у шахтного локомотиві / В.В. Проців, О.В. Новицький, А.І. Самойлов // «Науковий вісник НГУ», 2012, С. 79–83.
13. Измеров, О.В. Техническая инновационика. Рациональный выбор технических решений при проектировании / О.В. Измеров. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. – 340 с.
14. Захарченко, Д.Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины / Д.Д. Захарченко, П.Н. Шляхто. М., Трансжелдориздат, 1959. – Ч. 2. – 236 с.
15. Электровоз грузовой постоянного тока с асинхронными электродвигателями. Руководство по эксплуатации, часть 1 ЭЭС10.00.000.000 РЭ., ОАО «СТМ», 2009. – 101 с.
16. Пат. 2200103 Российская Федерация, МПК В61С015/04, В61F009/00. Устройство для увеличения сцепления колес локомотива с рельсами / Каган М.Я.; заявитель и патентообладатель Каган М.Я. – № 2001102093/28; заявл. 25.01.01; опубл. 10.03.03, Бюл. № 23. – 3 с.
17. Пат. 2246406 Российская Федерация, МПК В60В37/00, В61С15/04. Колесная пара локомотива / Сливинский Е.В., Зайцев А.А., Бровка С.В., Воробьев Е.И.; заявитель и патентообладатель Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. – № 2001102093/28; заявл. 21.07.03; опубл. 20.02.05, Бюл. № 15. – 3 с.
18. James G. Dalrymple. High adhesion magnetic rail. Pat. US 5526755 A, 18.06.1996.

19. Пат. 2055748 Российская Федерация, МПК В60С15/04. Устройство для увеличения сцепления колесной пары электровоза с рельсами / Цалоев Б.П., Пиранишвили Г.К.; заявитель и патентообладатель Цалоев Б.П., Пиранишвили Г.К. – № 93035718/11; заявл. 07.07.93; опубл. 10.03.96, Бюл. № 5. – 3 с.

20. Пат. 2281216 Российская Федерация, МПК В61С15/04. Устройство для повышения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Лемешко В.И., Хохлов Д.А., Воробьев И., Воробьев Д.В., Багров Г.В., Ивахин А.И.; заявитель и патентообладатель ФГУП «192 Центральный завод железнодорожной техники». – № 2007133051/11; заявл. 03.09.07; опубл. 10.12.11, Бюл. № 12. – 3 с.

21. Пат. 2405696 Российская Федерация, МПК В61С15/04. Устройство для повышения коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами / Попов В.А., Лужнов Ю.М.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИКТИ». – № 2009132121/11; заявл. 27.08.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 4. – 3 с.

Воробьев Владимир Иванович

Брянский государственный технический университет (БГТУ), кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» 241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, E-mail: bim@ostu.ru

Измеров Олег Васильевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ), соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» БГТУ 241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, E-mail: bim@ostu.ru

Борзенков Михаил Иванович

Госуниверситет – УНПК, г. Орел Кандидат технических наук, доцент, начальник Отдела научных изданий 302030, г. Орел, ул. Московская, 65 Тел.: 89616210440 E-mail: bim@ostu.ru

Авдащенко Владимир Степанович

Брянский государственный технический университет (БГТУ), соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» БГТУ 241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, E-mail: bim@ostu.ru

Корчагин Вадим Олегович

Российская открытая академия транспорта (филиал МГУПС) (РОАТ МИИТ), Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ МИИТ 125808, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2, E-mail: bim@ostu.ru

V.I. VOROBIEV, O.V. IZMEROV, M.I. BORZENKOV, V.S. AVDAZENKO, V.O. KORCHAGIN

CLASSIFICATION AS THE SYNTHESIS SOLUTION FOR RAILROAD TRACTION DRIVE TRANSMISSIONS

The problem of synthesis of technical solution of energy saving locomotive traction drive with anti-slip/slide protection by impact on contact of a wheel and a rail of electric current and a magnetic field is considered. Requirements to such drive solutions are defined and almost realized technical solution is offered.

Keywords: innovation problems, theory of knowledge, engineering design synthesis, railroad traction drive, wheel-rail adhesion, energy saving technologies.

BIBLIOGRAPHY

1. Pugachev, A.A. Snizheniye poter energii putem optimizatsii protivoboksovochnykh ustroystv v sisteme «koleso–rels». Doklad na XI Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy internet–konferentsii «Energо– i resursoberezheniye – XXI vek», A.A. Pugachev, O.V. Izmerov, S.G. Volokhov. – FGBOU VPO «Gosuniversitet – UNPK». – Орел, 2013.
2. Tikhomirov, V.P. Modelirovaniye stsepleniya kolesa s relsom: monografiya / V.P. Tikhomirov, V.I. Vorobyev, D.V. Vorobyev, G.V. Bagrov, M.I. Borzenkov, I.A. Butrin. – Орел: ОрелGTU, 2007. – 127 s.
3. Izmerov, O.V. Klassifikatsiya kak instrument sinteza mekhanicheskoy chasti tyagovykh privodov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: statya. / O.V. Izmerov, G.S. Mikhilchenko. – «Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin». – 2012. – №4 (39). – S. 53–60.
4. Tekhnicheskaya innovatsionika. Proyektirovaniye konkurentosposobnykh mashin: monografiya / O.V. Izmerov; pod red. chl.– kor. Akademii elektrotekhn. nauk RF, d–ra tekhn. nauk, prof. A. S. Kosmodamianskogo. – Орел: Gosuniversitet – UNPK, 2013. – 415 s.
5. Wehner David E. Electromagnetic traction increaser. Pat. US2198928 A, 2.12.1936.
6. Karel Kucera. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives. Pat. US3307058 A 20.01.1964.
7. A.s. 1286453 SSSR, MPK B61C15/04. Magnitnyy dogruzhatel relsovogo transportnogo sredstva / Mishin V.V., Zybrev V.A., Lebedev A.I., Salov V.A. Shlyakhov E.M. (SSSR). – 3803110/31–11; zayavleno 16.10.84; opubl. 30.01.87, Byul. 4. – 3 s.

8. John Otto Heinze Jr. Magnetic wheel. Pat. US709484 A, 24.02.1902.
9. A.s. 1011422 SSSR, MPK B61C15/04. Ustroystvo dlya uvelicheniya davleniya koles transportnogo sredstva na relsy / Salov V.L. (SSSR). – 3253205/27–11; zayavleno 18.02.81; opubl. 15.04.83, Byul. 14. – 3 s.
10. A.s. 1113296 SSSR, MPK B61C15/04. Ustroystvo dlya uvelicheniya nagruzki na osi relsovogo transportnogo sredstva / Salov V.L., Shatskin V.B., Dorozhkin V.N. (SSSR). – 3600604/27–11; zayavleno 03.06.83; opubl. 15.09.84, Byul. 34. – 3 s.
11. Sitnikov, Ye.A. Issledovaniya po povysheniyu tyagovykh svoystv manevrovyykh teplovozov putem primeneniya elektromagnitnogo uvelicheniya stsepleniya i boleye optimalnykh skhem soyedineniya tyagovykh elektrodvigately / Ye.A. Sitnikov, I.N. Rodionov, V.P. Grinevich // Otchet VNITI № I–108–82. Kolonna, 1982. – 83 s.
12. Protsiv, V.V. Perevagi magnitoreykovogo dovantazhuvacha nad reykovim galmom u shakhtnogo lokomotivi / V.V. Protsiv, O.V. Novitskiy, A.I. Samoylov // «Naukoviy visnik NGU», 2012, S. 79–83.
13. Izmerov, O.V. Tekhnicheskaya innovatsionika. Ratsionalnyy vybor tekhnicheskikh resheniy pri proyektirovani / O.V. Izmerov. – Orel: Gosuniversitet – UNPK, 2013. – 340 s.
14. Zakharchenko, D.D. Podvizhnoy sostav elektricheskikh zheleznykh dorog. Tyagovyye elektricheskiye mashiny / D.D. Zakharchenko, P.N. Shlyakhto. M., Transzheldorizdat, 1959. – CH. 2. – 236 s.
15. Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka s asinkhronnymi elektrodvigatelyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii, chast 1 2ES10.00.000.000 RE., OAO «STM», 2009. – 101 s.
16. Pat. 2200103 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61C015/04, B61F009/00. Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya koles lokomotiva s relsami / Kagan M.Ya.; zayavitel i patentoobladatel Kagan M.Ya. – № 2001102093/28; zayavl. 25.01.01; opubl. 10.03.03, Byul. № 23. – 3 s.
17. Pat. 2246406 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B60B37/00, B61C15/04. Kolesnaya para lokomotiva / Slivinskiy Ye.V., Zaytsev A.A., Brovko S.V., Vorobyev Ye.I.; zayavitel i patentoobladatel Yeletskiy gosudarstvennyy universitet im. I.A. Bunina. – № 2001102093/28; zayavl. 21.07.03; opubl. 20.02.05, Byul. № 5. – 3 s.
18. James G. Dalrymple. High adhesion magnetic rail. Pat. US 5526755 A, 18.06.1996.
19. Pat. 2055748 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B60C15/04. Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya kolesnoy pary elektrovoza s relsami / Tsaloyev B.P., Piranishvili G.K.; zayavitel i patentoobladatel Tsaloyev B.P., Piranishvili G.K. – № 93035718/11; zayavl. 07.07.93; opubl. 10.03.96, Byul. № 5. – 3 s.
20. Pat. 2281216 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61C15/04. Ustroystvo dlya povysheniya koeffitsiyenta stsepleniya vedushchikh koles lokomotiva s relsami / Lemeshko V.I., Khokhlov D.A., Vorobyev I., Vorobyev D.V., Bagrov G.V., Ivakhin A.I.; zayavitel i patentoobladatel FGUP «192 Tsentralnyy zavod zheleznodorozhnoy tekhniki». – № 2007133051/11; zayavl. 03.09.07; opubl. 10.12.11, Byul. № 5. – 3 s.
21. Pat. 2405696 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61C15/04. Ustroystvo dlya povysheniya koeffitsiyenta stsepleniya koles lokomotiva s relsami / Popov V.A., Luzhnov Yu.M.; zayavitel i patentoobladatel OAO «VNIKTI». – № 2009132121/11; zayavl. 27.08.09; opubl. 10.12.10, Byul. № 5. – 3 s.

Vorobiev Vladimir Ivanovich

Bryansk State Technical University (BSTU)
Ph.D., Associate Professor of «Railway rolling stock»
241035, Bryansk, Boulevard 50 years of October Str. 7,
E-mail: bim@ostu.ru

Izmerov Oleg Vasilevich

Bryansk State Technical University (BSTU)
Competitor of the Department «Railway rolling stock» BGTU
241035, Bryansk, Boulevard 50 years of October Str. 7,
E-mail: bim@ostu.ru

Borzenkov Mikhail Ivanovich

State University – ESPC, Orel
Ph.D., Associate Professor, Head of Scientific Publications
302030, Orel, ul. Moscow, 65
Ph.: 89616210440
E-mail: bim@ostu.ru

Avdaschenko Vladimir Stepanovich

Bryansk State Technical University (BSTU)
Competitor of the Department «Railway rolling stock» BGTU
241035, Bryansk, Boulevard 50 years of October Str. 7,
E-mail: bim@ostu.ru

Korchagin Vadim Olegovich

Russian Academy of open transport (branch MGUPS) (ROAP MIIT)
Assistant of the Department «Traction rolling stock» ROAP Engineering
125808, Moscow, ul. Chasovaya, d. 22/2,
E-mail: bim@ostu.ru

А.В. САМОТКАНОВ

СНИЖЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЯГОВОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

Приведена математическая модель мощности потерь энергии электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор. Рассчитана мощность потерь электропривода при его работе на тяговом подвижном составе при питании от вспомогательного синхронного генератора на различных позициях контроллера машиниста. Синтезирована автоматическая система регулирования температуры обмоток тяговой асинхронной машины, обеспечивающая минимизацию мощности потерь энергии электропривода вентилятора охлаждения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, поворотный статор, тяговый двигатель, мощность потерь, температура обмоток.

В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации электропривода вентилятора охлаждения на тяговом подвижном составе с точки зрения энергетических показателей качества. В качестве оптимизируемого показателя качества выбрана мощность потерь энергии, в качестве электропривода вентилятора рассмотрен электропривод с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор [1].

Математическое описание электропривода с двумя фазными асинхронными двигателями, статор одного из которых выполнен поворотным, а роторы соединены посредством добавочных резисторов, осуществлен на основе схемы замещения (рисунок 1) и двухфазной модели электропривода.

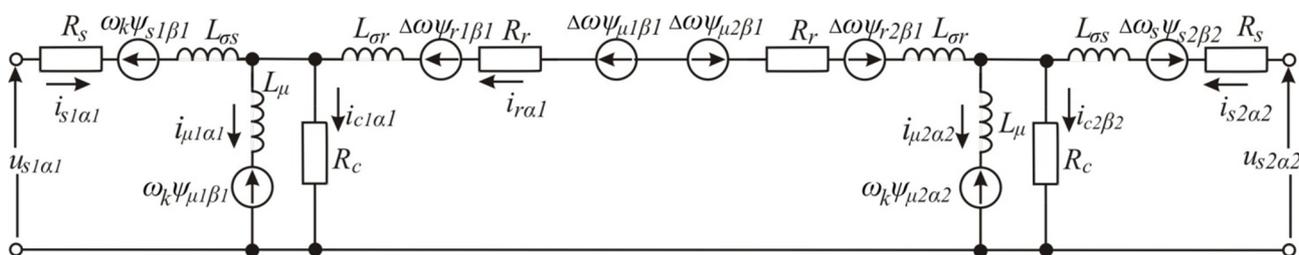


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения одной фазы электропривода

Система дифференциальных уравнений электрического равновесия обмоток двигателей в рассматриваемом электроприводе в соответствие с его эквивалентной схемой замещения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{u}_{s1,2} = \vec{i}_{s1} R_s + \frac{d\vec{\psi}_{s1}}{dt} + \frac{d\vec{\psi}_{\mu 1}}{dt} + j\omega_k(\vec{\psi}_{s1} + \vec{\psi}_{\mu 1}), \\ \vec{u}_{s2} = \vec{i}_{s2} R_s + \frac{d\vec{\psi}_{s2}}{dt} + \frac{d\vec{\psi}_{\mu 2}}{dt} + j(\omega_k \pm \omega_s)(\vec{\psi}_{s2} + \vec{\psi}_{\mu 2}), \\ 0 = 2\vec{i}_r R_r + \frac{d\vec{\psi}_{r1}}{dt} + \frac{d\vec{\psi}_{r2}}{dt} + \frac{d\vec{\psi}_{\mu 1}}{dt} + \frac{d\vec{\psi}_{\mu 2}}{dt} + j(\omega_k - \omega)(\vec{\psi}_{r1} + \vec{\psi}_{r2} + \vec{\psi}_{\mu 1} + \vec{\psi}_{\mu 2}), \\ \vec{i}_{c1,2} R_c = j\omega_k \vec{\psi}_{\mu 1,2} + \frac{d\vec{\psi}_{\mu 1,2}}{dt}, \\ \vec{i}_{c1,2} + \vec{i}_{\mu 1,2} = \vec{i}_{s1,2} + \vec{i}_{r1,2}. \end{array} \right. \quad (1)$$

На рисунке 1 и в выражениях (1) приняты следующие обозначения: R_s, R_r – сопротивления обмоток статора и ротора соответственно, R_c – сопротивление, учитывающее потери в стали, R_δ – добавочное сопротивление, вводимое в цепь роторов, $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ – собственные индуктивности рассеяния обмоток статоров и роторов, L_μ – главная индуктивность, $\omega_k, \omega_s, \omega_r$ –

частоты вращения системы координат, поворотного статора и валов роторов соответственно, φ – угол поворота статора, $u_{s1,2}$, $i_{s1,2}$ – напряжения и тока двух статоров, $i_{r1,2}$ – токи роторов, $i_{c1,2}$ – токи, протекающие через сопротивление, учитывающее потери в стали, $i_{\mu 1,2}$ – токи намагничивания, $\psi_{s1,2}$, $\psi_{r1,2}$, $\psi_{\mu 1,2}$ – собственные потокоцепления статора, ротора и главное потокоцепление соответственно.

Для получения корректной картины электромеханических и энергетических процессов сопротивление обмотки ротора определено с учетом эффекта вытеснения тока, т.к. он оказывает влияние при работе на низких частотах. Также при моделировании учтено явление насыщения по главному магнитному пути и нелинейная зависимость потерь в стали статора от частоты тока статора. На рисунке 2 приведены нелинейности (рассчитаны по эмпирическим выражениям [2, 3]), учитываемые при моделировании двигателя. Все величины представлены в относительных единицах.

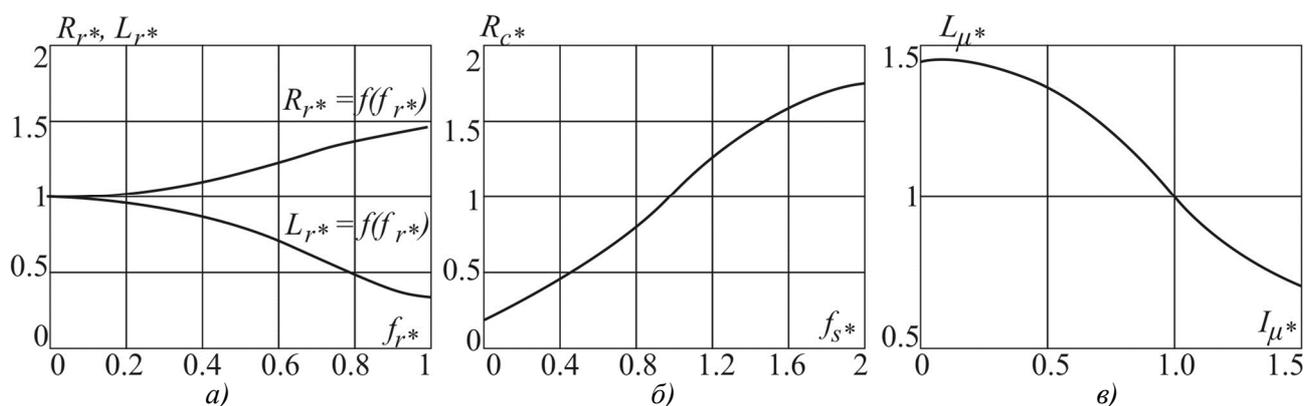


Рисунок 2 – Зависимости сопротивления R_{r*} и индуктивности L_{r*} ротора от частоты тока ротора $f_{r*} = f_r / f_{s,ном}$ (а), сопротивления R_{c*} от частоты тока статора f_{s*} (б), зависимость взаимной индуктивности $L_{\mu*}$ от тока намагничивания $I_{\mu*}$ (в)

Уравнения электромагнитного момента каждого двигателя:

$$M_1 = \frac{3 p_n}{2 L_{\sigma r}} [(L_{\sigma r} i_{r\alpha 1} + \psi_{\mu 1\alpha 1}) \psi_{\mu 1\beta 1} - (L_{\sigma r} i_{r\beta 1} + \psi_{\mu 1\beta 1}) \psi_{\mu 1\alpha 1}].$$

$$M_2 = \frac{3 p_n}{2 L_{\sigma r}} [(L_{\sigma r} i_{r\alpha 1} - \psi_{\mu 2\alpha 2} \cos \varphi - \psi_{\mu 2\beta 2} \sin \varphi)(\psi_{\mu 2\alpha 2} \sin \varphi - \psi_{\mu 2\beta 2} \cos \varphi) + (L_{\sigma r} i_{r\beta 1} + \psi_{\mu 2\alpha 2} \sin \varphi - \psi_{\mu 2\beta 2} \cos \varphi)(-\psi_{\mu 2\alpha 2} \cos \varphi - \psi_{\mu 2\beta 2} \sin \varphi)].$$

Суммарный момент электропривода:

$$M = M_1 + M_2.$$

Для оценки энергетических процессов использованы следующие выражения.

Механическая мощность на валу двигателя:

$$P_{mex} = M\omega.$$

Активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_{sa} = 3/2 (i_{sa} u_{sa} + i_{s\beta} u_{s\beta}).$$

Баланс мощностей с учетом потерь в меди статора и ротора, а также в стали статора:

$$P_{sa} = P_{mex} + \Delta P_{м.ст.} + \Delta P_{р.рот.} + \Delta P_{с.ст.}.$$

Принятый при моделировании момент сопротивления:

$$M_c = 0,0044\omega^2.$$

Моделирование выполнено для электропривода с асинхронными двигателями ДМТГ 012–06. Зависимость относительной мощности потерь энергии $\Delta P/P_{мex,ном}$ и абсолютного скольжения $s_a = (\omega_0 - \omega) / \omega_{0,ном}$ от угла поворота статора φ показана на рисунке 3.

Анализ графиков (рисунок 3) показывает, что кривые мощности потерь имеют выраженный минимум при углах поворота, меньших π , что указывает на возможности снижения потерь энергии электропривода по сравнению со схемой прямого включения (нерегулируе-

мый электропривод). Режим минимума мощности потерь смещается в сторону меньших углов поворота статора при уменьшении текущей позиции контроллера машиниста.

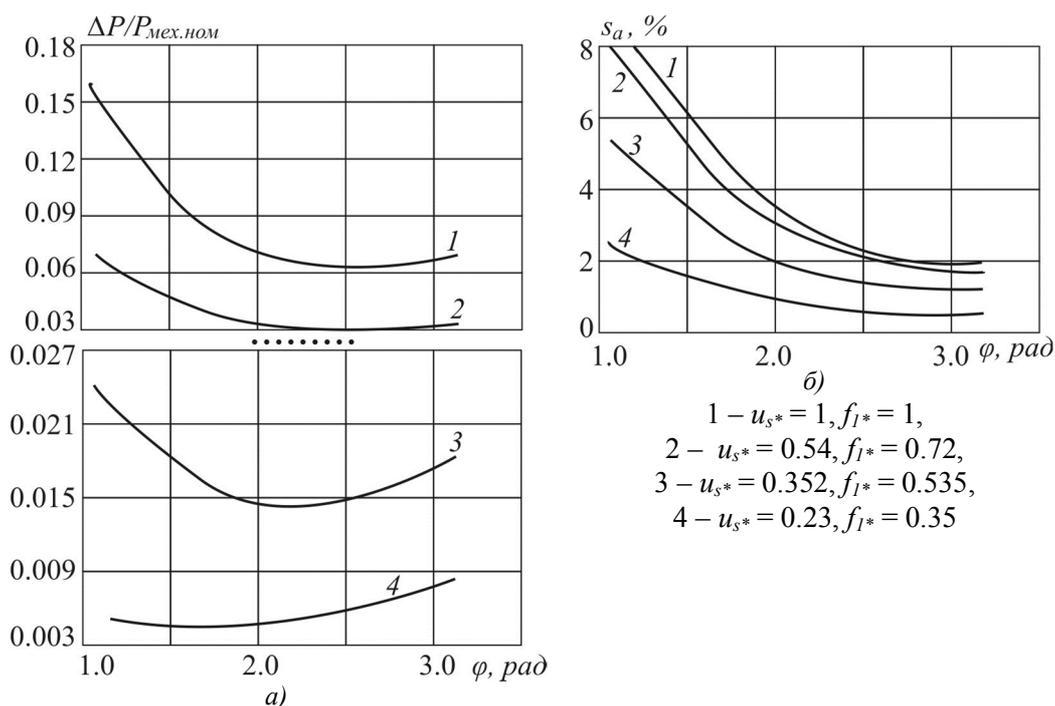


Рисунок 3 – Зависимость относительной мощности потерь энергии $\Delta P/P_{\text{мех.ном}}$ (а) и скольжения s_a (б) от угла поворота статора φ

Так на верхней позиции минимум мощности наступает при $\varphi = \pi/1,2$ (при этом мощность потерь энергии снижается на $0,005\Delta P/P_{\text{мех.ном}}$, что соответствует 7% мощности потерь при $\varphi = \pi$, т.е. когда двигатели работают аналогично схеме механического вала, развивая одинаковые моменты). На нижней позиции контроллера машиниста минимум мощности наступает при $\varphi = \pi/2,5$ (мощность потерь энергии снижается на $0,004\Delta P/P_{\text{мех.ном}}$, что более, чем в два раза меньше мощности потерь при $\varphi = \pi$ на текущей позиции контроллера машиниста). Скольжение при этом меняется в узком диапазоне (минимум мощности потерь на верхней позиции контроллера машиниста наступает при повышении скольжения на 0,28%, на нижней позиции – при 0,98%), что обеспечивает достаточно высокую стабильность поддержания частоты вращения. Следует отметить, что изменение напряжения и частоты тока генератора происходит таким образом, что напряжение уменьшается в меньшей степени по отношению к частоте при переходе на пониженные позиции контроллера машиниста.

Анализ переходных процессов, протекающих в электроприводе, показал, что с уменьшением частоты вращения электропривода затягивается время переходного процесса, увеличивается число колебаний и перерегулирование. При отработке возмущающих воздействий наибольшее перерегулирование по скорости наблюдается при изменении момента сопротивления и амплитуды напряжения. Что касается воздействия на систему величины регулятора, то здесь, как и ожидалось, наименьшая статическая ошибка регулирования присутствует при наибольшем значении пропорционального коэффициента, наибольшим значениям коэффициента соответствуют более колебательные процессы с большей величиной отклонений скорости от установившегося значения. При изменениях «в большом» переходные процессы характеризуются меньшими колебательностью и перерегулированием, чем при изменениях «в малом».

Автоматическая система регулирования температуры тяговой асинхронной машины, обеспечивающая минимизацию мощности потерь энергии электропривода вентилятора охлаждения, показана на рисунке 4.

Автоматическая система регулирования температуры тяговой асинхронной машины работает следующим образом.

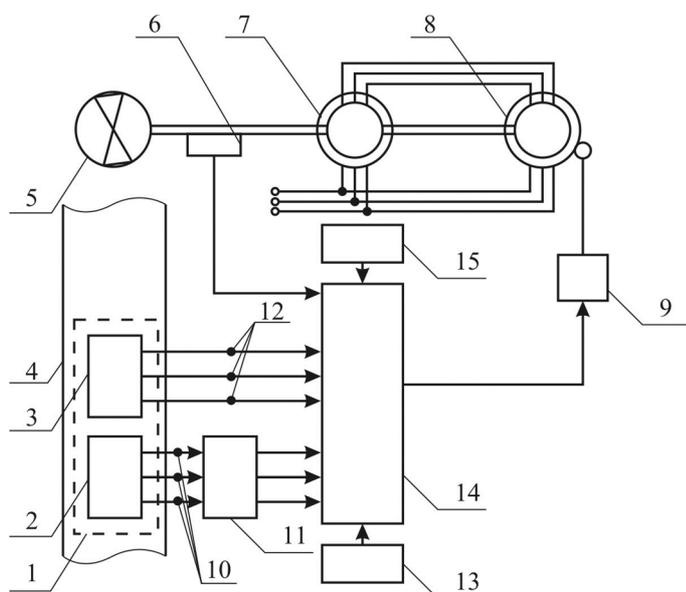


Рисунок 4 – Функциональная схема автоматической системы регулирования температуры тяговой асинхронной машины:

1 – тяговая асинхронная электрическая машина, 2 – ротор тяговой машины, 3 – ротор тяговой машины, 4 – канал охлаждения, 5 – вал вентилятора, 6 – датчик частоты вращения вала вентилятора, 7 – асинхронный двигатель, 8 – асинхронный двигатель с поворотным статором, 9 – привод поворота статора, 10 – датчики температуры статора, 11 – скользящий контакт, 12 – датчики температуры ротора, 13 – блок задания температуры, 14 – микропроцессорный контроллер, 15 – датчик мощности электропривода вентилятора

значения выше $t_p \min$ выходной сигнал микропроцессорного контроллера 14 увеличивается выходной сигнал микропроцессорного контроллера 14, подаваемый на механизм поворота статора 9 асинхронного двигателя 8. Это приводит к увеличению выходного сигнала механизма поворота статора 9 и, соответственно, к увеличению угла поворота статора асинхронного двигателя 8. При этом результирующая эдс роторов асинхронных двигателей 7 и 8 больше нуля, в обмотках роторов протекает ток, у электропривода вентилятора развивается момент, вал начинает вращаться, увеличивается подача воздуха вентилятором охлаждения 5. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равновесный тепловой режим в системе охлаждения тяговой асинхронной машины.

При достижении t_p максимального значения $t_p \max$, заданного в блоке задания температуры 13, выходной сигнал микропроцессорного контроллера 14 максимален. Угол поворота статора составляет 180 эл.град., векторы эдс обмоток роторов полностью совпадают, результирующая эдс ротора достигает максимального значения, электропривод развивает максимальный момент, скорость вращения вала вентилятора, а, следовательно, и его подача воздуха будут максимальны.

Минимизация мощности потерь энергии происходит в установившемся режиме. Микропроцессорный контроллер вырабатывает тестовый сигнал отклонения угла поворота статора треугольной формы, вследствие чего позиция текущей рабочей точки относительно минимального значения мощности потерь может быть определена регистрацией изменения мощности потерь датчиком 15 в течение первого полупериода.

Алгоритм поиска экстремума приведен ниже:

- если мощность потерь ΔP увеличивается), то текущее значение угла поворота статора φ меньше своего оптимального значения φ_{opt} при заданных условиях работы электропривода;
- если ΔP уменьшается, то $\varphi > \varphi_{opt}$;
- если $\Delta P \approx 0$, то $\varphi = \varphi_{opt}$.

При значении регулируемой температуры наиболее нагретого узла t_p меньше минимально заданного в блоке задания температуры 13 значения $t_p \min$ выходной сигнал микропроцессорного контроллера 14, подаваемый на механизм поворота статора 9 асинхронного двигателя 8, имеет минимальное значение, при этом выходной сигнал механизма поворота статора также имеет минимальное значение. Статор асинхронного двигателя 8 занимает положение (т.е. угол поворота), при котором скорость вращения вала вентилятора 6 и его подача воздуха равны нулю. Это обусловлено тем, что при согласном положении статоров асинхронных двигателей 7 и 8, когда угол поворота статора двигателя 8 составляет 0 эл.град., эдс в роторных обмотках направлены встречно, и результирующая эдс ротора равна нулю. При этом ток в роторной цепи равен нулю, электромагнитный момент электропривода равен нулю, скорость вращения вала вентилятора 6 равна нулю.

При увеличении t_p и достижения

Для того, что бы режим работы электропривода был максимально приближен к режиму минимума мощности потерь, необходимо задать требуемый знак скорости нарастания угла поворота следующим образом:

– если ΔP увеличивается, то управляющее воздействие должно уменьшать угол поворота статора;

– если ΔP уменьшается, то управляющее воздействие должно увеличивать угол поворота статора.

Приведенная автоматическая система регулирования температуры обмоток тягового асинхронного двигателя позволит повысить надежность работы тяговых асинхронных двигателей и локомотива в целом, за счет более высокой точности обеспечения температурного режима обмоток тяговой асинхронной машины и уменьшения мощности потерь энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космодамианский, А.С. Дифференциальные уравнения асинхронного электропривода с поворотным статором / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // НТТ – наука и техника транспорта. – 2008. – № 3. – С. 50 – 55.

2. Пугачев, А.А. Моделирование энергетических процессов в электроприводах с асинхронным двигателем на базе эквивалентной схемы замещения / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, А.С. Космодамианский // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: IV Международная научно-техническая конференция: сборник трудов. – Тольятти. – 2012. – Ч. 1. – С. 208 – 213.

3. Космодамианский, А.С. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 26 – 31.

Самотканов Александр Васильевич

Российская открытая академия транспорта (филиал МГУПС) (РОАТ МИИТ), г. Москва

Старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав РОАТ МИИТ»

125808, г. Москва, ул. Часовая, 22/2

A.V. SAMOTKANOV

REDUCTION OF POWER LOSSES OF THE ELECTRIC DRIVE THE COOLING FAN ON TRACTION ROLLING STOCK

The mathematical model of power losses of electric drive consisted of two induction motors one of which has rotatory stator are shown. Electric drive power losses used on a traction rolling stock and fed by auxiliary synchronous generator under different controller position is calculated. The automatic temperature control system of traction induction motor windings providing of cooling fan electric drive power losses minimization are designed.

Keywords: induction motor, rotatory stator, traction motor, power losses, windings temperature.

BIBLIOGRAPHY

1. Kosmodamianskij, A.S. Differencialnye uravnenija asinhronnogo jelektroprivoda s povorotnym statorom / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobev, A.A. Pugachev // NTT – nauka i tehnika transporta. – 2008. – № 3. – S. 50 – 55.

2. Pugachev, A.A. Modelirovanie jenergeticheskikh processov v jelektroprivodah s asinhronnym dvigatelem na baze jekvivalentnoj shemy zameshhenija / A.A. Pugachev, V.I. Vorobev, A.S. Kosmodamianskij // Problemy jelektrotehniki, jelektrojenergetiki i jelektrotehnologii: IV Mezhdunarodnaja nauchno–tehnicheskaja konferencija: sbornik trudov. – Toljatti. – 2012. – Ch. 1. – S. 208 – 213.

3. Kosmodamianskij, A.S. Modelirovanie jelektroprivoda s asinhronnym dvigatelem v rezhime minimuma moshhnosti poter / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobev, A.A. Pugachev // Jelektrotehnika. – 2012. – № 12. – C. 26 – 31.

Samotkanov Alexander Vasilyevich

Russian Open Transport Academy (MSUT branch)

Senior teacher of the Department «Tractive Stock»,

22/2 Chasovaya str., 125808 Moscow

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.787.4

И.Н. БОБРОВСКИЙ, П.А. МЕЛЬНИКОВ, А.А. ЛУКЪЯНОВ, А.В. ЕЖЕЛЕВ

К ЗАДАЧАМ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛОВ МАШИН

В статье рассмотрена проблема энергоэффективности работы трибологических узлов машин. Авторами рассмотрены основные потери механической энергии в типовых узлах и деталях автомобилей. Определены оптимальные методы повышения энергоэффективности. Выделены основные параметры микрогеометрии поверхности, влияющие на эксплуатационные свойства и энергоэффективность деталей.

Ключевые слова: микрорельеф, поверхностно-пластическое деформирование, трибологическая система.

Энергоэффективность в машиностроении. Современные средства повышения энергоэффективности в машиностроении отличаются большим разнообразием, однако в области исследования перспективных технологий финишной обработки мало внимания уделяется методам повышения энергоэффективности работы обрабатываемых деталей машин и узлов, в частности с помощью образованного в 70-ые годы научного направления формирования регулярных микрорельефов. К сожалению, трудности связанные с переходным периодом в экономике и последующая приостановка производства отечественного обрабатывающего оборудования пропорционально снизили потребность в НИР и ОКР для машиностроения (крайне показательно в данном случае история развития действующего ГОСТ–2789 «Шероховатость поверхности», обновлявшегося в 45, 51, 59, 73 и последний раз в 81 годах), в результате остались не использованными накопленные за годы работы технические компетенции отечественных научных школ, например, авторы принимали участие в работе по прогнозированию формирования микрорельефа после обработки блока цилиндров автомобилей LADA, в настоящее время осуществляемым платовершинным хонингованием на немецком оборудовании, хотя было бы более рационально применять в промышленном производстве нашей страны разработанные нашими учеными технологии, однако требуется время и ресурсы на восстановление требуемых технических компетенций. Ведутся активные работы в данном направлении, создана и функционирует «Комиссия при Президенте по модернизации и технологическому развитию экономики России», отечественными научными школами разрабатываются ряд технологий мирового уровня в области машиностроения [1–4].

Микрорельеф – путь повышения энергоэффективности работы деталей машин. Тенденция к повышению энергоэффективности работы машин связаны с одновременной оптимизацией требований к микрорельефу поверхности деталей машин определяющему уровень механических потерь в трибологических системах – 15% вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания энергии расходуется на механические потери от трения [5]. Существующая технология финишной обработки двигателей направлена на формирование микрорельефа с помощью хонингования [5], при этом необходимо учитывать, что поверхность блока цилиндров двигателя (также называемая «зеркало цилиндра») является наиболее ответственной деталью и при обработке менее ответственных деталей хонингование не применяется, учитывая его технико-экономические характеристики. Рациональность применения именно процессов поверхностно-пластического деформирования (ППД) для нанесения микрорельефа обоснована Шнейдером Ю.Г. в работе «Эксплуатационные свойства деталей с микрорельефом» – отмечено, что кинематика процесса ППД позволяет наиболее полно контролировать нанесения микрорельефа, а введение дополнительных параметров в процесс регулирования

кинематики позволяет получить более сложные и функциональные микрорельефы, исключая появления эффектов адгезии, молекулярного сцепления и коррозии. Основным отличием ППД от других финишных технологий обработки, позволяющих добиться требуемого уровня снижения шероховатости поверхности, например, полирования, является эффект повышения микротвердости поверхностного слоя.

ППД – оптимальный метод нанесения микрорельефа. Технологии ППД непрерывно развиваются в качестве метода финишной обработки [6]. Пройдя путь от применения ППД в мелкосерийном и единичном производствах для ответственных деталей исследование процессов ППД позволило распространить их в серийное и массовое производство деталей машин. Вектор развития технологий ППД в мире направлен на комбинирование процесса ППД с другими технологиями обработки, например, лазерными или ультразвуковыми, что отражается в наиболее цитируемых публикациях – это позволяет добиться улучшения качества обработанного поверхностного слоя, но усложняет конструкцию и ограничивает применение данных технологий лабораторными исследованиями и мелкосерийным или единичным производством. Максимизации эффекта от применения новых технологий энергосбережения можно получить с помощью внедрения их в массовое производство и выполнения цикла разработки с учетом необходимости соответствия критериям энергоэффективности и производительности. Исследования по разработкам высокопроизводительных технологий ППД, в частности широкого выглаживания ведутся в настоящее время и достигли определенных результатов, однако необходимо расширения спектра полезных эффектов от данных технологий в частности энергоэффективности обработанных с помощью ППД деталей машин.

Проблемная ситуация в области исследований технологий нанесения микрорельефа ППД связана с отсутствием работ, учитывающих появление новых инструментальных материалов и новых конструкционных материалов. Не установлена взаимосвязь между двумя группами входных параметров:

- 1) микрогеометрий и физико–механическими свойствами поверхности обрабатываемых деталей;
- 2) формой, микрогеометрией и физико–механическими свойствами инструмента и их влияние на выходные параметры – микрогеометрию и физико–механической свойства обработанных деталей с помощью различных режимов обработки.

С учетом перечня приоритетных направлений исследований в РФ [6] рационально классифицировать известные технологии по следующим критериям:

- Энергоэффективность технологии; [7]
- Экологичность технологии;
- Параметры микрогеометрии на которые возможно влиять с помощью технологии.

Логично, исходя из данных критериев, оценивать и задачи исследований новых технологий ППД.

Требования к энергоэффективности технологии. В существующих работах по технологиям нанесения микрорельефа ППД СОТС рассматривается как обязательный компонент, однако успешный опыт внедрения в промышленные производства технологии обработки ППД без СОТС позволяет поставить тезис о возможности и эффективности технологии нанесения микрорельефа без СОТС, с учетом, появившихся в последнее время современных инструментальных материалов, например нанокнб. Энергозатраты на применение СОТС составляют существенную долю в общих энергозатратах процессов финишной обработки, на примере полирования – 50% от общих энергозатрат (расход мощности на привод шпинделя 1 кВт; на привод насоса охлаждения 0,11 кВт; на привод осцилляции 1,5 кВт; на привод устройства для очистки охлаждающей жидкости 1,5 кВт.)

Требования к экологичности технологии. Нанесение микрорельефа позволит оптимизировать работу трибосопряжения для повышения КПД и снижения вредных факторов:

1. Снижение потерь на трение в работе пары «поверхность блока цилиндра – кольцо»;
2. Уменьшение количества вредных выбросов;
3. Отказ от СОТС.

Применение СОТС не только требует энергоресурсов [8], но и отрицательно сказывается на экологической ситуации в регионе с массовым производством, требующим системы транспортировки, хранения, использования и утилизации СОТС. Компоненты СОТС, бакте-

рициды и фунгициды, возникающие продукты реакций, а также занесённые инородные вещества также могут вызывать ряд профессиональных заболеваний, данные германского агентства по охране окружающей среды также говорят о том, что до 30% всех профзаболеваний работников машиностроительных предприятий связаны с контактом с СОТС в процессе трудовой деятельности. Загрязнение атмосферы происходит в результате испарения и сжигания отработавших СОТС.

Параметры микрогеометрии. Существующие технологии финишной обработки развивались в условиях изменяющихся требований к параметрам обработанной поверхности, и кажущаяся очевидной тенденция к снижению абсолютных значений средней высоты микронеровностей (R_a) неверна, т.к. в большинстве случаев необходимо получить не гладкую поверхность, а поверхность с определенным набором физико–механических свойств, определяемых группами параметров микрорельефа. В частности, ярко это иллюстрирует пример с изменяющимися требованиями к обработке поверхности блока цилиндров, когда от минимизации параметра R_a вновь перешли к его рациональному повышению в 60-х годах, одновременно варьируя другие параметры. Следовательно, содержанием исследования в данном аспекте будет вначале оценка существующих технологий по количеству параметров микрогеометрии, на которые возможно воздействие и в дальнейшем оптимизация по данным параметрам разрабатываемой технологии. Оптимизация технологии по совокупности этих параметров микрогеометрии это не только разработка методики определения оптимальных режимов обработки, но и разработка максимально конкретизированных технических требований к устройствам для реализации разрабатываемой технологии.

Параметры микрорельефа определяют функциональные свойства обработанных деталей и дальнейшую работу всего трибосопряжения. Потери на трение на примере блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания или деталей трансмиссии составляют большую часть энергии потерь (до 25%). Содержанием исследования в аспекте будет оценка влияния технологии обработки на долговечность деталей, работающих в условиях трения, например, с помощью влияния на показатель маслостойкости поверхности и ряд других показателей.

Задачи будущих исследований будут заключаться в определении групп параметров микрогеометрии, которые возможно изменять с помощью существующих и разрабатываемых технологий и которые необходимо нормировать при конструировании новых изделий. Даже для существующих и применяемых в настоящее время технологий финишной обработки нормируются не все необходимые для полного описания микрогеометрии параметры: для операций полирования нормируются параметры средней шероховатости (R_a), а для хонингования: глубина ядра шероховатости (R_{pk}), среднее значение высоты выступающих за пределы ядра выступов профиля (R_k), среднее значение глубины проникающих за пределы ядра в материал впадин профиля (R_{vk}); при этом дополнительные параметры микрогеометрии (отличные от R_a) были введены в конструкторскую документацию в РФ лишь несколько лет назад.

Управление свойствами поверхности через параметры микрогеометрии возможно лишь при условии нормирования этих параметров в конструкторской документации и возможностей выбранной технологии по управлению данными параметрами, т.к. полированием возможно влиять только на один параметр R_a , хонингованием – на несколько параметров, а применение ППД позволит влиять на большое количество параметров, определяя функциональные свойства поверхности.

Естественный переход от малоинформативных параметров, вроде R_a и R_z к параметрам, связанным с кривой Эббота (R_{vk} , R_k , R_{pk}), предоставленными впервые в DIN 4776 в 1985 г. и стандартизированными в ISO 13565–2 в начале века, скоро вновь повторится. В 1994 году была издана книга «Разработка методов определения шероховатости в трех измерениях», данная работа получила развитие и в 2002 году была издана работа «Развитие методов определения шероховатости в трех измерениях». В ней впервые были грамотно обоснованы и представлены подходы к определению трехмерных параметров микрогеометрии, что могло бы позволить повысить качество продукции за счет более полного понимания механизмов получения микропрофиля после обработки, т.к. ключевым здесь является понимание влияния процесса воздействия на деталь и изменение её микрогеометрии.

Планируемые исследования желателен выполнять с учётом новейших мировых тенденций в области нормирования параметров микрогеометрии, т.к. для определения физико–

геометрических параметров поверхности деталей машин и разработки технологических процессов, обеспечивающих энергоэффективность работы обработанных деталей машин, необходимо более полные представления о требованиях к реализации разрабатываемой технологии. При разработке новых технологий необходимо использовать параметры из новейших стандартов, например разработанных в Германии и США (EN ISO 13565–2, GPS–Surface Texture: Profile Method, Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve, 1997 или ASME. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and lay), ASME B46.1. 1995 или стандарт DIN 4768. Производственная норма DB 31007), параметры из данных стандартов пока отсутствуют в межгосударственных стандартах РФ в области нормирования и обозначения шероховатости (ГОСТ 2789–73) и их актуализация является необходимостью.

Возможность моделирования любых поверхностей с любыми параметрами микро и макрогеометрии появилась в связи с развитием вычислительной техники, однако сама по себе без понимания структуры процессов получения готовой поверхности возможность моделирования трехмерных поверхностей не дает новой информации, поэтому исследования в данном направлении обязательно должны включать экспериментальную часть.

Развитие теории трехмерного нормирования параметров привело к появлению прикладных работ, в которых были представлены конкретные параметры обработки. Например, в статье [9] Майка Зенчино вводятся такие группы параметров как высотные параметры (S_a , S_q , S_z , S_{sk} , S_{ku}), промежуточные, гибридные, функциональные. С применением этих параметров автором была построена модель шлифования. Анализ мировых тенденций в области нормирования параметров макрогеометрии показывает, что в ближайшее время теоретические и технические разработки по данному направлению достигнут нового уровня, что позволит мировым производителям внедрить указанные параметры в техническую документацию.

Разработка научных основ является фундаментальным этапом разработки любой технологии необходимым для дальнейшего развития и последующего внедрения результатов в промышленность. Отсутствие новых отечественных стандартов в области нормирования макрогеометрии поверхности или хотя бы деятельности по адаптации зарубежных стандартов свидетельствует о ситуации сложившейся в машиностроении. Однако, очевидны тенденции к ее улучшению, отдельные отечественные работы в данной области возможно внедрить в промышленность в приемлимые сроки, с учетом того, что необходимое измерительное оборудование для реализации положений данных стандартов производится в РФ (например, сканирующие нанотвердомеры).

Проведение научно-исследовательской работы осуществляется при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК–6076.2013.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov, V.P. Nonlinear dynamics of the elastic smoothing of surfaces / V.P. Kuznetsov, V.G. Gorgots // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – № 12. – p.p. 1201–1206.
2. Захаров, О.В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами / О.В. Захаров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 9. – С. 32–35.
3. Горшков, Б.М. Опытнo-экспериментальная установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков / Б.М. Горшков, О.Ю. Ремнева, Д.В. Вылегжанин, Н.С. Самохина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 2. – С. 121–124.
4. Пат. 2259910 Российская Федерация, МПК В24В. Регулируемая головка для обкатывания / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Самойлов Н.Н., Гаврилин А.М., Афанасьев Б.И., Катунин А.А., Фомин Д.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ОрелГТУ. – № 2004130254/02; заявл. 12.10.2004; опубл. 10.09.2005, Бюл. № 17 – 3 с.
5. Hill, S. Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption // SAE International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, September 2001, San Antonio, TX, USA, Session: Heavy Duty Diesel Engine Lubricants. – 2001. – № 2001–01–3550.
6. Бобровский Н.М. Устройство для гиперпроизводительной финишной обработки поверхностей деталей выглаживанием / Н.М. Бобровский, А.В. Ежелев, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 6–1. – С. 93–96.
7. Приоритетные направления развития науки [Электронный ресурс] URL: http://www.kremlin.ru/ref_notes/987.
8. Василенко, О.А. Теоретическое обоснование развития комбинированной техники подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга / О.А. Василенко, В.Г. Семенов, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 5. – С. 72–78.
9. Zecchino, M. Characterizing surface quality: why average roughness is not enough, Advanced Materials and Processes. – 2003. – vol. 161. – № 3. – p.p. 25–28.

Бобровский Игорь Николаевич

Тольяттинский государственный университет
кандидат технических наук, начальник лаборатории
«Автомобильные технологии»
Тел.: +79626129325
E-mail: bobri@yandex.ru

Мельников Павел Анатольевич

Тольяттинский государственный университет
кандидат технических наук, директор института химии и
инженерной экологии
Тел.: +78482546484
E-mail: topavel@mail.ru

Лукьянов Алексей Александрович

Тольяттинский государственный университет, маги-
странт
Тел.: +78482546484
E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Ежелев Андрей Викторович

Тольяттинский государственный университет, аспирант
Тел.: +78482546484
E-mail: bobri@yandex.ru

I.N. BOBROVSKIJ, P.A. MELNIKOV, A.A. LUKYANOV, A.V. EZHELEV

**FUNDAMENTAL TECHNOLOGIES RESEARCH OF THE TASKS
OF ENERGY EFFICIENCY OF MACHINE UNITS**

In this paper considered the problem of energy efficiency operation of tribological machine elements. Determined the optimal methods to improve energy efficiency. The basic parameters of the surface microgeometry to affecting performance properties and energy efficiency of machine parts are defined.

Keywords: microrelief, surface plastic deformation, tribological system.

BIBLIOGRAPHY

1. Kuznetsov, V.P. Nonlinear dynamics of the elastic smoothing of surfaces / V.P. Kuznetsov, V.G. Gorgots // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – № 12. – p.p. 1201–1206.
2. Zakharov, O.V. Upravleniye tochnostyu besstentrovogo shlifovaniya statisticheskimi metodami / O.V. Zakharov // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2009. – № 9. – S. 32–35.
3. Gorshkov, B.M. Opytno-eksperimentalnaya ustanovka dlya otsenki effektivnosti povysheniya tochnosti koordinatno-rastochnykh stankov / B.M. Gorshkov, O.YU. Remneva, D.V. Vylegzhanin, N.S. Samokhina // Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – № 2. – S. 121–124.
4. Pat. 2259910 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B24B. Reguliruyemaya golovka dlya obkатыvaniya / Stepanov YU.S., Kirichek A.V., Samoylov N.N., Gavrilin A.M., Afanasyev B.I., Katunin A.A., Fomin D.S.; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO OrelGTU. – № 2004130254/02; zayavl. 12.10.2004; opubl. 10.09.2005, Byul. № 17 – 3 s.
5. Hill, S. Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption // SAE International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, September 2001, San Antonio, TX, USA, Session: Heavy Duty Diesel Engine Lubricants. – 2001. – № 2001-01-3550.
6. Bobrovskiy N.M. Ustroystvo dlya giperproizvoditelnoy finishnoy obrabotki poverkhnostey detaley vyglazhivaniyem / N.M. Bobrovskiy, A.V. Yezhelev, P.A. Melnikov, I.N. Bobrovskiy // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2012. – Т. 14. – № 6-1. – S. 93–96.
7. Prioritetnyye napravleniya razvitiya nauki [Elektronnyy resurs] URL: http://www.kremlin.ru/ref_notes/987 (data obrashcheniya: 07.11.2014).
8. Vasilenko, O.A. Teoreticheskoye obosnovaniye razvitiya kombinirovannoy tekhniki podachi SOZH pri ploskom shlifovanii periferiyye kruga / O.A. Vasilenko, V.G. Semenov, A.V. Tyukhta, YU.V. Vasilenko // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 5. – S. 72–78.
9. Zecchino, M. Characterizing surface quality: why average roughness is not enough, Advanced Materials and Processes. – 2003. – vol. 161. – № 3. – p.p. 25–28.

Bobrovskij Igor Nikolaevich

Togliatti State University
Ph.D., head of lab «Automotive Technologies»
445667, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Ph.: +79626129325
E-mail: bobri@yandex.ru

Melnikov Pavel Anatolevich

Togliatti State University
Ph.D., Dir. of Chemistry and Engineering Ecology
445667, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Ph.: +78482546484
E-mail: topavel@mail.ru

Lukyanov Aleksey Aleksandrovich

Togliatti State University
MA student
445667, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Ph.: +78482546484
E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Ezhelev Andrej Viktorovich

Togliatti State University
postgraduate student
445667, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Ph.: +78482546484
E-mail: bobri@yandex.ru

А.Н. КОНОПЛЕВ, Ю.А. КРОПОТОВ

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОСТАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНО–КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА ДЛЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается задача разработки программного обеспечения автоматизированной системы составления оперативно–календарного плана методами минимизации времени технологического цикла для мелкосерийного радиоэлектронного производства. Проведены исследования оценивания эффективности выполнения задачи оперативно–календарного планирования различными методами. В результате был разработан алгоритм и программное обеспечение для автоматизированной системы по составлению оперативно–календарного плана на основе алгоритма муравьиной колонии.

Ключевые слова: оперативно–календарное планирование, технологический процесс, технологический цикл, автоматизированная система, алгоритм муравьиной колонии.

Качество и эффективность функционирования производственного процесса предприятия во многом определяется эффективностью оперативно–календарного планирования. Задачи оперативно–календарного планирования отражают процесс распределения во времени ограниченного числа ресурсов для выполнения проекта, состоящего из заданного множества взаимосвязанных работ. Процесс организации оперативно–календарного планирования достаточно трудоемкий и требующий существенных временных затрат, в то же время существующие технологии составления оперативно–календарных планов не всегда в состоянии отслеживать динамику изменения условий организации производства. Поэтому целью работы является разработка автоматизированной системы составления оперативно–календарных планов производства радиоэлектронных изделий с применением эффективных методов, которые адаптивно с высоким быстродействием учитывают динамику изменения условий в организации производств. Задачей исследования является разработка алгоритма автоматизированного составления оперативно–календарного плана мелкосерийного производства радиоэлектронных изделий, на основе методов минимизации времени производственных циклов и с учетом всех технологических условий.

Для решения задачи составления календарного плана организации производственного процесса, применяются известные методы [1] такие, как:

- методы математического программирования, включающие методы и алгоритмы целочисленного линейного программирования и динамического программирования;
- комбинаторные методы, а именно метод ветвей и границ;
- методы локального поиска, к данным методам относятся методы имитационного моделирования, табуированный поиск;
- эвристические методы, к ним относятся генетические алгоритмы и алгоритм муравьиной колонии.

Анализ выше перечисленных методов показал, что использование комбинаторного метода и метода динамического программирования не удовлетворяет показателю быстродействия вычисления, так как с ростом размерности задачи экспоненциально возрастает длительность вычислений. Использование имитационного моделирования, сталкивается с необходимостью применения большого объема статистических данных для моделирования, а также с недостаточностью точности получения данных.

При решении задач календарного планирования находят применение эвристические методы. Эвристические методы основаны на алгоритмах построения производственных планов без проведения полного или частичного перебора вариантов, то есть по правилу, которое называется «снижением требований». Оно заключается в отказе от поиска оптимального ре-

шения и нахождения вместо этого «хорошего решения» за приемлемое время. Однако методы, применяемые для построения алгоритмов такого типа, значительно зависят от специфики задачи. Таким образом, универсального алгоритма построения производственных планов не существует и использование того или иного эвристического правила можно применять после того, как конкретная производственная задача была предварительно проработана с применением других методов и выбрано наиболее приемлемое решение согласно экспертным оценкам, с учетом критериев оптимальности [2, 3].

Поэтому наиболее перспективными методами решения задачи календарного планирования представляются методы и алгоритмы, такие как генетический алгоритм [4], муравьиный алгоритм [5] и метод табуированного поиска (Tabu Search) [6]. Математически задачу оперативно–календарного планирования или задача RCPSP (Resource–constrained Project Scheduling Problem) можно представить следующим образом. Для оперативно–календарного планирования технологический процесс разделяется на технологические операции изготовления радиоэлектронных изделий. Предположим, что на производственном участке собирается n партий изделий радиоэлектронной продукции d_i , ($i = 1, 2, 3 \dots n$), для этого используется m , ($m = 1, 2, 3 \dots l$) специализированных станций. Маршрут каждого изделия состоит из j технологических операций, которые нужно выполнить над изделием d_i , и обозначается O_{ij} , ($j = 1, 2, 3 \dots q_i$), где q_i – общее количество операций которых надо выполнить над изделием. Отметим, что две операции из маршрута одного изделия не могут выполняться одновременно. Каждая технологическая операция O_{ij} характеризуется параметрами $O_{ij} = (M_{o_{ijm}}, T_{o_{ijm}})$, где $M_{o_{ijm}}$ – номер группы специализированной станции по производству радиоэлектронных изделий, на которой будет выполнена технологическая операция O_{ij} , а $T_{o_{ijm}}$ – продолжительность выполнения технологической операции на станции m . При последовательном выполнении операций предусматривается строгая упорядоченность технологического маршрута. Если через $O_{ijm} t_{нач}$ обозначить время начала технологической операции O_{ij} на специализированной станции m , а через $O_{ijm} t_{кон}$ – окончание технологической операции, тогда $T_{o_{ijm}} = O_{ijm} t_{кон} - O_{ijm} t_{нач}$. Очевидно, что в математической модели оперативно–календарного планирования необходимо выполнить условие вида: $O_{ijm} t_{нач} \geq O_{ijm-1} t_{кон}$, которое показывает, что последующая технологическая операция на специализированной станции не начинается до завершения технологической операции на предыдущей станции.

Процесс функционирования системы может быть описан путем задания плана работ, совокупности указаний относительно того, какие именно технологические операции какими именно группами специализированных станций обслуживаются в каждый момент времени. Очевидно, построение такого графа эквивалентно определению чисел $O_{ijm} t_{нач}$ – моментов начала технологической операции O_{ij} . Поэтому план работы можно рассматривать как совокупность моментов начала технологических операций $\{O_{ijm} t_{нач}\}$.

Так как возможно получение бесчисленного множества планов (графов), которые удовлетворяют сформулированным условиям, то задача состоит в построении наилучшего плана работ в соответствии с выбранными критериями.

Математическую модель задачи можно представить в следующем виде:

$$F_h \rightarrow \min, \quad h \in \{1, f\},$$

$$\sum_{m=1}^l \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ijm} (T_{o_{ijm}} * a_{ij} + t_{o_{ijm}}^{\text{пер.}}) \leq \sum_m^l \varphi_m,$$

$$T_{o_{ijm}} = O_{ijm} t_{\text{кон}} - O_{ijm} t_{\text{нач}},$$

$$O_{ijm} t_{\text{нач}} \geq O_{ijm-1} t_{\text{кон}}.$$

где $m, (m = 1, 2, 3 \dots l)$ – номер специализированной станции;
 $i, (i = 1, 2, 3 \dots n)$ – номер обрабатываемого изделия;
 $j, (j = 1, 2, 3 \dots q_i)$ – порядковый номер технологической операции которую необходимо выполнить над изделием;

O_{ijm} – булева переменная, принимающая значение «1» если j технологическая операция по обработки i -ого изделия выполняется на станции m ;

$T_{o_{ijm}}$ – продолжительность выполнения технологической операции на станции m ;

a_{ij} – размер партии;

$t_{o_{ijm}}^{\text{пер.}}$ – время перепрограммирования станции на новую партию;

φ_m – фонд времени работы m единиц станций на горизонте планирования. Из данной математической модели можно выделить критерий минимизация длительности производственного цикла, который определяется как:

$$F_1 = \sum_{m=1}^l \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ijm} (T_{o_{ijm}} * a_{ij} + t_{o_{ijm}}^{\text{пер.}}) \rightarrow \min.$$

Таким образом, задача оперативно–календарного планирования сводится к построению графа, который удовлетворяет всем сформулированным в задании условиям. В этом случаи критерий минимизации длительности производственного цикла – F_1 достигнет своего экстремального значения. Задача составления эффективного оперативно–календарного плана состоит в применении наилучшего метода для нахождения кратчайшего пути в графе, который проходит через все события только один раз и имеет наименьшую продолжительность.

Как показано выше метод генетического алгоритма, метод табуированного поиска и метод алгоритма муравьиной колонии являются основными при решении задач создания эффективного оперативно–календарного планирования. Поэтому проведены исследования оценивания эффективности выполнения задачи оперативно–календарного планирования вышеуказанными методами по критериям: общее время выполнения всех технологических операций, время расчета производственного плана для производственных процессов, включающих различное количество технологических операций. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования.

| Количество технолог. операций | Генетический алгоритм | | Алгоритм муравьиной колонии | | Табуированный поиск | |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | Общее время произв. цикла, мин. | Время расчета плана, сек. | Общее время произв. цикла, мин. | Время расчета плана, сек. | Общее время произв. цикла, мин. | Время расчета плана, сек. |
| 20 | 385 | 52 | 391 | 74 | 398 | 17 |
| 50 | 599 | 103 | 584 | 115 | 643 | 41 |
| 100 | 728 | 365 | 714 | 384 | 819 | 152 |
| 200 | 1295 | 748 | 1072 | 782 | 1534 | 987 |
| 500 | 1872 | 1553 | 1645 | 1580 | 2305 | 1170 |

Из таблицы 1 видно, что алгоритм муравьиной колонии по сравнению с генетическим алгоритмом имеет преимущество по критерию минимальная длительность производственного цикла. Сравнение алгоритма муравьиной колонии с методом табуированного поиска при применении их в решении задач календарного планирования, показывает, что применение метода табуированного поиска дает несколько большее быстроедействие, но по критерию минимальная длительность производственного цикла имеет существенно худшие параметры по длительности.

На рисунке 1 приведено графическое сравнение различных методов для задачи оперативно–календарного планирования по критерию минимальное время производственного процесса.

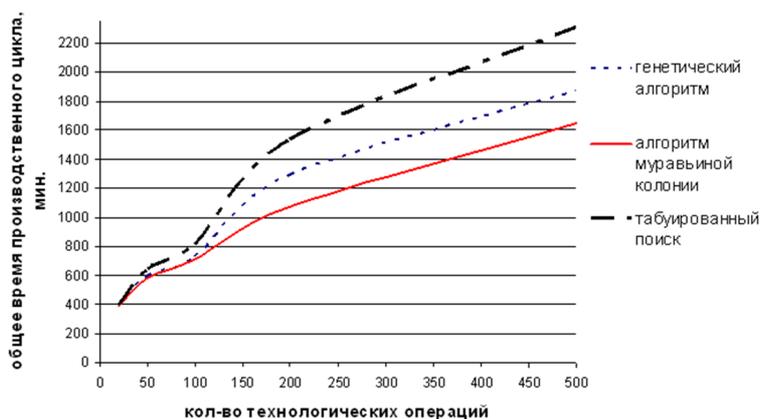


Рисунок 1 – Длительность производственного цикла в зависимости от числа операций при различных методах организации планирования

Муравьиные алгоритмы основаны на поведении муравьёв, связанным с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к цели и быстрая адаптация к изменяющимся условиям для нахождения нового кратчайшего пути [5].

В соответствии с алгоритмом муравьиной колонии, поиск экстремума функции в алгоритме использует параллельное движение нескольких муравьёв, которые в ходе движения метят свой путь некотором количеством специального вещества – феромона. Значение феромона задается функцией. Моделирование испарений феромона (с течением времени значение функции уменьшается) в алгоритме, необходим для того, чтобы найденное локально–оптимальное решение не будет единственным, т.е. в алгоритме заложено, что муравей будет искать и другие пути. Информация о ходе движения остальных муравьёв аккумулируется в общей базе знаний и используется каждым муравьем независимо друг от друга. Каждый муравей при выборе направления движения ориентируется не только на приращение целевой функции, но и на статистическую информацию о движении остальных муравьёв, накопленную в базе знаний.

Для решения задачи с использованием алгоритма муравьиной колонии, необходимо:

- представить задачу в виде ориентированного взвешенного графа;
- задать правило определения и нанесения концентрации феромона;
- разработать эвристику поведения муравья при построении решения;
- определить метод или средство проверки потенциального решения с учетом условий задачи;
- настроить параметры алгоритма, такие как: количество муравьёв, момент обновления феромона и т.п.

Обобщенная схема работы алгоритма для решения задачи оперативно–календарного планирования имеет вид:

1. Представить задачу в виде ориентированного взвешенного графа.

Для задачи оперативно–календарного планирования составляется граф, в котором вершинами является единицы автоматизированных станций, выполняющих технологиче-

ские операции. Ребрами графа является время выполнения технологической операции, которое включает в себя также время ожидания освобождения следующей станции, времени перепрограммирования станции и т.д.

2. Создание стартовой точки.

В данном пункте алгоритма задается стартовая точка, куда помещается муравей и начальный уровень феромона. Стартовая точка, зависит от условий задачи, так как для каждой задачи способ размещения муравьев является определяющим. Либо все они помещаются в одну точку, либо в разные с повторениями, либо без повторений. Начальный уровень феромона инициализируется небольшим положительным числом для того, чтобы на начальном шаге вероятности перехода в следующую вершину не были нулевыми.[4]

Как известно из [7,8], для задачи оперативно-календарного планирования, для определения стартовой точки необходимо запустить обход муравьев графа без нанесения феромона. Данное действие позволит назначить стартовую точку не из произвольного пространства, а из какого-либо локального экстремума.

Для определения времени на данный этап нулевого прохода, вычисляется число итераций обхода муравья h по формуле вида [8]:

$$h = \frac{h_0}{e},$$

где h_0 – это начальное число итераций,

e – число Эйлера.

3. Находится решение.

На данном этапе алгоритма формируется построение решения, которое начинается с нулевого частного решения и с поступательным добавлением к данному решению допустимой новой компоненты. Выбор новой компоненты перехода осуществляется определением вероятности перехода муравья k из вершины i в вершину j по следующему выражению:

$$P_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{j \in J_{i,k}} \tau_{ij}(t)^\alpha (\eta_{ij})^\beta}, & \text{если } j \in J_{i,k} \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \notin J_{i,k} \end{cases},$$

где $\tau_{ij}(t)$ – уровень феромона на дуге графа;

η_{ij} – эвристическая информация (где хранится расстояние между вершинами);

$J_{i,k}$ – множество доступных для посещения вершин;

α – коэффициент значимости концентрации феромона;

β – коэффициент значимости эмпирической информации.

Следует отметить, что при $\alpha = 0$ выбирается работа с наибольшей продолжительностью, что соответствует «жадному» алгоритму. При $\beta = 0$ выбор маршрута основывается только на уровне феромона, что приводит к вырождению маршрутов и соответственно к одному субоптимальному решению.

4. Обновление уровня феромона.

Обновление феромона осуществляется для выбора наилучшего варианта пути движения, так как концентрация феромона увеличивается на коротком (лучшем) пути и уменьшается на других. Данное свойство алгоритма позволяет избежать большой сходимости алгоритма.

При переходе на следующий узел, муравей откладывает феромон в соответствии с формулой:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t),$$

где $\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L(t)}$, $L(t)$ – длина пути;

ρ – коэффициент интенсивности испарения феромона.

Для исключения нулевой вероятности выбора ребра и для выполнения ограничений минимального и максимального значения коэффициента ρ , значение коэффициента должно находиться в пределах $0 < \rho < 1$.

5. Происходит выбор критического пути по критерию минимальной длительности производственного цикла, выбранный путь является субоптимальным планом работы.

Разработанный выше алгоритм представлен в виде блок-схемы на рисунке 2 и реализован специализированным программным обеспечением для автоматизированной системы разработки календарных планов организации производственного процесса по изготовлению радиоэлектронных изделий, фрагмент программы представлен на рисунке 3.

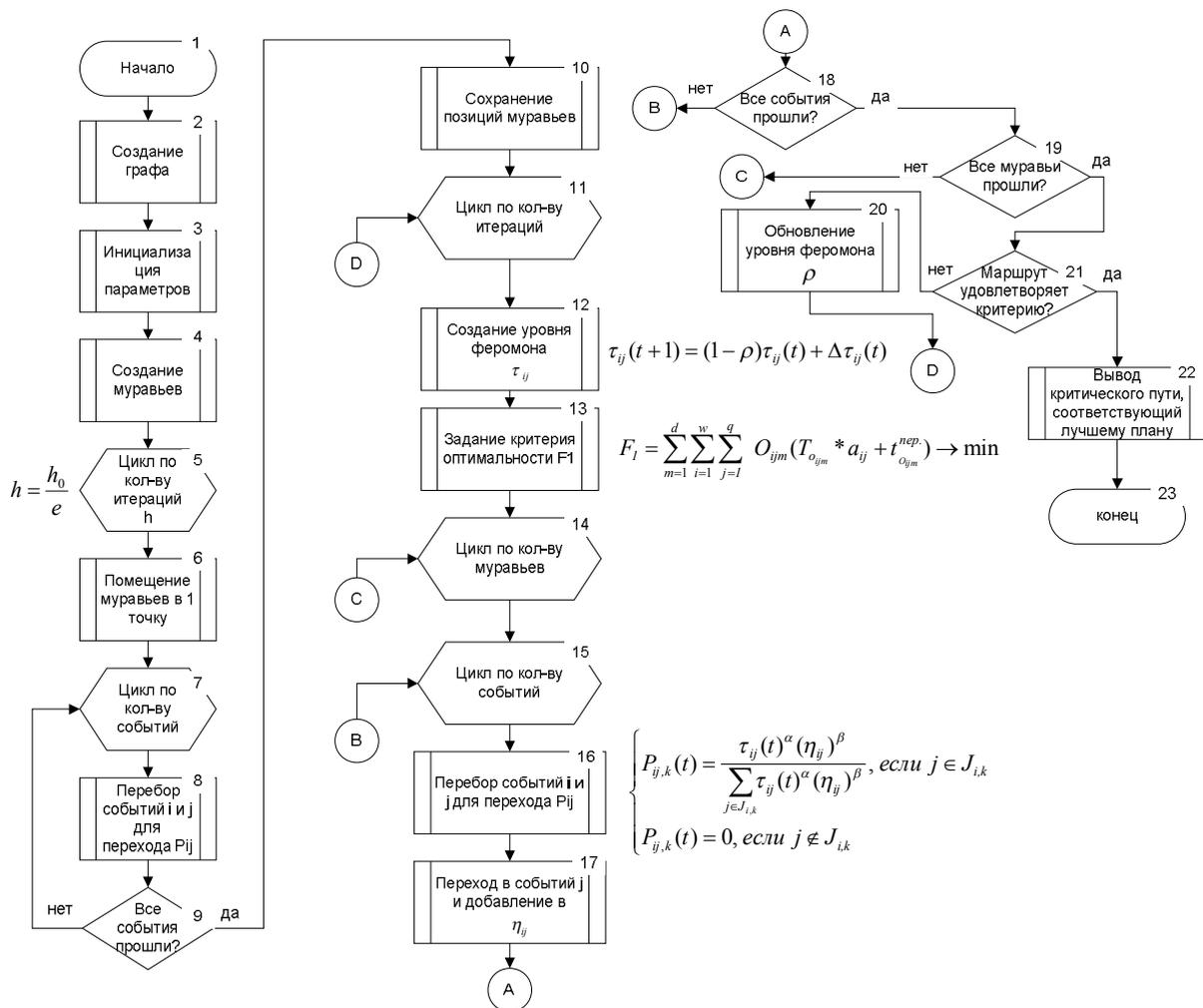


Рисунок 2 – Алгоритм разработки календарного плана по критерию минимальное время производственного процесса на основе алгоритма муравьиной колонии

Анализ методов по формированию календарных планов производственного процесса: эвристического, математического программирования, комбинаторного, показало, что наилучший метод позволяющий минимизировать время технологического цикла, является алгоритм муравьиной колонии. Разработан алгоритм специализированного программного обеспечения для автоматизированной системы составления оперативно-календарного плана организации процесса производства радиоэлектронных изделий на основе алгоритма муравьиной колонии.

```

. . .
procedure Muravei(point:integer);
var
  i,h,k      :integer;
  z,chislo   :double;
begin
  init(point);
  for h:=1 to count -1 do
    begin
      z:=0;
      for i:=1 to count do
        if MposPoint[point,i] then
          { MposPoint матрица указывает, последовательность прохождения вершин}
          z := z + tau[point,i]/l[point,i];
          for i:=1 to count do
            if MposPoint[point,i] then
              MposPoint[point,i] :=100* Mpos[point,i]/l[point,i] / z;
              {Mpos матрица, указывает какие вершины еще не прошел муравей}
              chislo:=0;
              for i:=1 to count do
                if MposPoint[point,i] then
                  begin
                    chislo := chislo + p[point,i];
                    MposPoint[point,i] := chislo;
                  end;
              z:= random(100000)/100;
              k:=0;
              for i:=1 to count do
                if MposPoint[point,i] then
                  if z< p[point,i] then
                    begin
                      k:=i;
                      break;
                    end;
              MposPoint[point,k]:=false;
              // k - точка куда муравей перемещается
              i:=1;
              while t[point,i]<>0 do
                inc(i);
                t[point,i]:=k;
            end;
            k:= 0;
            //вычисляем путь
            for i:=1 to count-1 do
              k:=k+l[t[point,i],t[point,i+1]];
              k:=k+l[t[point,1],t[point,count]];
              put[point]:=k;      //запомнили значение пути
            end;
  . . .

```

Рисунок 3 – Фрагмент программы, вычисления блоков 14–18 блок–схемы ПО автоматизированной системы составления оперативно–календарных планов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы/ А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. – М.:МГУ, 2011.– 224 с.
2. Маляренко, И.А. Планирование и оптимизация / И.А. Маляренко // Корпоративные системы. – 2006. – № 27. – С. 29–32.
3. Кропотов, Ю.А. Исследование и расчет статических параметров сигналов при проектировании оперативно–командных телекоммуникационных систем / Ю.А. Кропотов, А.А. Быков, А.Н. Коноплев // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 11/ Под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина. – М.: «Радиотехника». – 2009. – С. 317–321.
4. Hartmann, S.A. Competitive Genetic Algorithm for Resource – Constrained Project Scheduling/ Naval Research Logistics – 1998. –750 p.

5. Штовба, С.Д. Муравьиные алгоритмы / С.Д. Штовба // Научно–практический журнал Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70–75.
6. Ponnambalam, S.G. A Tabu Search Algorithm for Job Shop Scheduling / S. G. Ponnambalam, P. Aravindan, S. V. Rajesh // The International Journal of Advanced manufacturing Technology August. – 2000. – V. 16. – P. 765–771.
7. Dorigo, M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents/ M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. – 1996. – V. 26. – № 1. – P. 1–13.
8. Dorigo, M. Ant Algorithms for Discrete Optimization / M. Dorigo, G.D. Caro L., M. Gambardella // Artificial Life. – 1999. – Vol. 5. – № 2. – p.p. 137–172.

Коноплев Алексей Николаевич

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром
Старший преподаватель кафедры «Электроника и вычислительная техника»
Тел.: +7(49234)77272.
E-mail: 23-hero@mail.ru

Кропотов Юрий Анатольевич

Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром
Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроника и вычислительная техника»
Тел.: +7(49234)77272.
E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

A.N. KONOPLEV, YU.A. KROPOTOV

**SYSTEM OF AUTOMATED OPERATIVE
CALENDAR PLAN SMALL–SCALE PRODUCTION**

The problem of the software development of the automated system of building the operational scheduling by methods of minimization of time of a technological cycle for small–batch radio–electronic production is considered. The Researches of estimation of efficiency of performance of a problem of operational scheduling by various methods. In result was developed an algorithm and software for the automated system on compiling operational scheduling based on ant colony algorithm.

Keywords: operation scheduling, technological process, technological cycle, automated system, the ant colony algorithm.

BIBLIOGRAPHY

1. Lazarev, A.A. Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy./ A.A. Lazarev, Ye.R. Gafarov. – М.:MGU, 2011.– 224 с.
2. Malyarenko, I.A. Planirovaniye i optimizatsiya / I.A. Malyarenko // Korporativnyye sistemy. – 2006. – № 27. – S. 29–32.
3. Kropotov, Yu.A. Issledovaniye i raschet staticheskikh parametrov signalov pri proyektirovaniy operativno–komandnykh telekommunikatsionnykh sistem / Yu.A. Kropotov, A.A. Bykov, A.N. Konoplev // Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii: mezhvuz. sb. nauchn. tr. – Vyp. 11/ Pod red. V.V. Romashova, V.V. Bulkina. – М.: «Radiotekhnika». – 2009. – S.317–321.
4. Hartmann, S.A. Competitive Genetic Algorithm for Resource – Constrained Project Scheduling/ Naval Research Logistics – 1998. –750 p.
5. Shtovba, S.D. Muravinye algoritmy / S.D. Shtovba // Nauchno–prakticheskiy zhurnal Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh. – 2003. – № 4. – S. 70–75.
6. Ponnambalam, S.G. A Tabu Search Algorithm for Job Shop Scheduling / S. G. Ponnambalam, P. Aravindan, S. V. Rajesh // The International Journal of Advanced manufacturing Technology August. – 2000. – V. 16. – P. 765–771.
7. Dorigo, M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents/ M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. – 1996. – V. 26. – № 1. – P. 1–13.
8. Dorigo, M. Ant Algorithms for Discrete Optimization / M. Dorigo, G.D. Caro L., M. Gambardella // Artificial Life. – 1999. – Vol. 5. – № 2. – p.p. 137–172.

Konoplev Alexey Nikolaevich

Murom Institute (branch) GOU VPO «Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs» Murom
Senior lecturer in «Electronics and Computers»
Ph.: +7 (49234) 77272.
E-mail: 23-hero@mail.ru

Kropotov Yuri Anatolievich

Murom Institute (branch) GOU VPO «Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs» Murom
Ph.D., professor, head of «Electronics and Computers»
Ph.: +7 (49234) 77272.
E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.2.082:615.849.19

П.М. БЕЛЫХ, И.Н. НОВИКОВА, А.В. ДУНАЕВ, Е.В. ШУРАЕВА

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРТОПЕДИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ПО АНАЛИЗУ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО–ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ БИОТКАНЕЙ

Данная работа посвящена оценке эффективности применения ортопедического средства в виде варежки, применяемой при синдроме Рейно, вибрационной болезни и ряде других заболеваний микроциркуляторно–тканевых систем организма. Приведена методика проведения эксперимента, описаны расчётные параметры и представлены результаты исследований изменений параметров микроциркуляторно–тканевых систем до и после использования ортопедического средства.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая тканевая оксиметрия, пульсоксиметрия, флуоресцентная спектроскопия, ортопедическое средство, микроциркуляторно–тканевые системы.

Долгое время в медицине существует проблема диагностики и лечения заболеваний, связанных с нарушением микроциркуляторно–тканевых систем (МТС) организма человека, к примеру, таких как вибрационная болезнь, синдром Рейно, последствия травм, переломов и другие патологии [1]. Для лечения подобных заболеваний чаще всего применяют различные инвазивные методы, специальные мази, крема, массажи и также широко применяют ортопедические средства, эффективность которых обуславливается особенностью их конструкции, способом применения, длительностью применения, свойствами наполнителя [2].

На сегодняшний день рынок современной медицины переполнен многообразием различных ортопедических средств, из которых очень трудно выбрать наиболее эффективные. Одним из таких средств является ортопедическое изделие из микросфер в виде варежки (ООО «Альсария», г. Орёл), представленное на рисунке 1.



Рисунок 1 – Ортопедическое средство на основе микросфер (варежка)

Основная особенность данного ортопедического изделия заключается в том, что оно состоит из наполнителя, который представляет собой смесь из микростеклофер (микросфер): натриевоборосиликатного стекла размерами 15–200 мкм и микростеклофер из калий–натриевого стекла размерами 50–160 мкм с кремнийорганическим покрытием, который находится в двух чехлах (внутреннем и внешнем). Структура смеси микростеклофер во внутреннем чехле представлена на рисунке 2 [3].

За счет наличия специального наполнителя микросфер ортопедическое средство, по мнению производителя [4], обладает рядом специфических свойств, которые должны улучшить кровоток в конечностях, а именно: эффектом псевдоневесомости, эффектом отражения, обеспечивающим воздействие лечебным инфракрасным излучением и так называемым «эффектом биорезонанса», а также saniрующим и антиаллергическими эффектами.

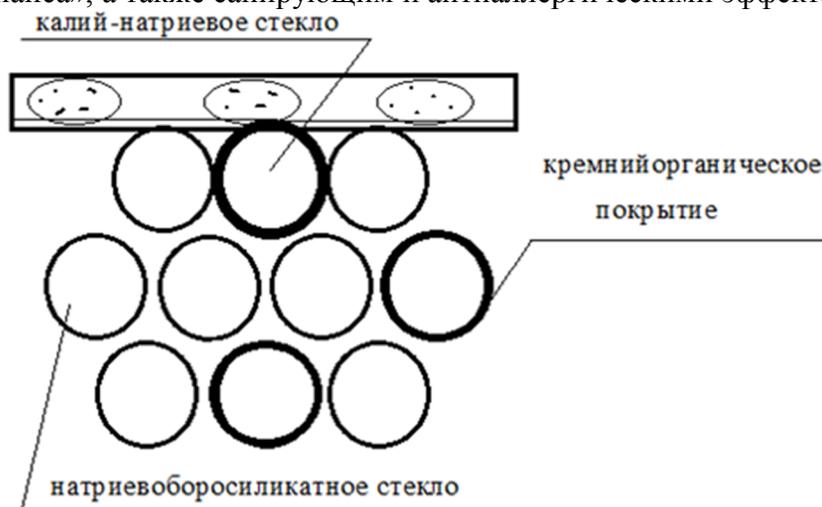


Рисунок 2 – Структура смеси микростеклофер во внутреннем чехле ортопедического средства

Эффект псевдоневесомости реализуется за счет схожести свойств наполнителя со свойствами жидкости, такими как внутренний коэффициент трения (или вязкость), благодаря которому наполнитель оказывает наименьшее сопротивление изменению формы при неизменном объеме и сохраняет способность при воздействии внешнего давления передавать это давление по всем направлениям одинаково [3]. Данное свойство приводит к улучшению кровоснабжения тканей и органов, происходит стимуляция системы микроциркуляции крови, улучшается трофика, что обеспечивает более интенсивное протекание репаративных процессов. Псевдоневесомость также способствует максимальному расслаблению мышц при применении ортопедических свойств.

Эффект отражения позволяет распределить в процессе проведения процедуры (применение ортопедического средства) инфракрасное тепло человеческого тела. Инфракрасное излучение проникает в глубокие слои биоткани и может приводить к прогреванию всей толщи кожных покровов и подкожных тканей, в результате может происходить повышение потенциальной энергии клеток организма, может повышаться деятельность специфических клеточных структур, расти уровень иммуноглобулинов, увеличиваться активность ферментов и эстрогенов [3, 4]. Увеличение температуры может вызывать увеличение локального кровотока, как следствие, возрастает объем крови циркулирующей в тканях, ускоряются обменные процессы. Активация микроциркуляторного русла и повышение проницаемости сосудов может способствовать дегидратации воспалительного очага и удалению продуктов распада клеток. Использование данного ортопедического средства может приводить к ускорению заживления ран и трофических язв за счет активации пролиферации и дифференцировки фибробластов.

Таким образом, применение данных ортопедических средств на основе микросфер может приводить к значительным положительным изменениям в состоянии МТС биотканей, связанных в первую очередь с состоянием периферического кровотока и динамикой утилизации кислорода тканями. Оценка отклика МТС на внешнее воздействие является актуальной и важной задачей при использовании ортопедического средства и анализе эффективности его применения. Следует отметить, что ранее уже предпринимались попытки [5] оценить изменения параметров системы микроциркуляции крови при применении данного ортопедического средства с помощью лишь лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Однако, оценка изменений комплексных па-

раметров МТС (тканевое дыхание и др.) с помощью и других неинвазивных оптических методов диагностики не была проведена.

Таким образом, основной целью данной работы явилась оценка изменений комплексных параметров микроциркуляторно–тканевых систем биотканей в результате применения ортопедического средства в виде варежки из микросфер.

В настоящее время для исследования МТС широкое применение получили различные оптические неинвазивные технологии. В данной работе применялись такие, как ЛДФ, оптическая тканевая оксиметрия (ОТО), пульсоксиметрия (ПО) и флуоресцентная спектроскопия (ФС) [6].

Метод ЛДФ основан на неинвазивном зондировании ткани лазерным излучением и регистрации отраженного и рассеянного излучения от движущихся эритроцитов в диагностическом объеме (около 2–3 мм³ при зондировании ИК–излучением). Основным регистрируемым параметром является показатель микроциркуляции, измеряемый в относительных перфузионных единицах, который определяется следующим выражением [7]:

$$I_m = K \cdot N_{\text{эп}} \cdot V_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где I_m – показатель микроциркуляции (ПМ);
 K – коэффициент пропорциональности;
 $N_{\text{эп}}$ – среднее количество эритроцитов;
 $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость эритроцитов в зондируемом объеме.

Значение данного параметра варьируется в зависимости от анатомической области и зависит от пространственной ориентации направлений основных потоков крови [6].

Метод оптической тканевой оксиметрии основан на спектрофотометрическом анализе различных фракций гемоглобина при зондировании биоткани излучением двух диапазонов длин волн (красного 630 нм и зеленого 530 нм). Основными регистрируемыми параметрами являются тканевая сатурация (S_tO_2), определяемая выражением (2), которая показывает долю фракций оксигемоглобина по отношению к различным фракциям гемоглобина, и уровень объемного кровенаполнения, который рассчитывается по формуле (3) и показывает процентное содержание различных фракций гемоглобина в диагностируемом объеме биоткани [6, 8]:

$$S_tO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где S_tO_2 – тканевая сатурация;
 C_{HbO_2} – молярная концентрация оксигемоглобина;
 C_{Hb} – молярная концентрация дезоксигемоглобина.

$$V_b = \frac{C_{HbO_2} + C_{Hb}}{C_{HbO_2} + C_{Hb} + C_{\text{other}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где V_b – объемное кровенаполнение;
 C_{other} – молярная концентрация всех остальных (других, то есть сторонних) оптических поглотителей в ткани.

Как известно, метод пульсоксиметрии основан на способности гемоглобина, связанного (HbO_2) и не связанного с кислородом (Hb), абсорбировать свет различной длины волны. Измеряя разницу между количеством света, абсорбируемого во время систолы и диастолы, данный метод позволяет определить процентное содержание (сатурацию) оксигемоглобина в артериальной крови [9].

Флуоресцентная спектроскопия основана на зондировании биообъекта излучением в видимой области спектра с целью возбуждения эндогенных и экзогенных флуоресцирующих биомаркеров кожи (NADH, флавины, липофусцины, порфирины и др.) и регистрации спектров флуоресценции. Данный метод позволяет регистрировать и анализировать *in vivo* содержание в тканях и органах веществ, определяющих метаболизм и жизнеспособность клеток и тканей [10].

Для оценки изменений параметров МТС при применении ортопедического средства на основе микросфер была проведена серия тестовых экспериментов на добровольце мужского пола (25 лет) с синдромом холодных рук (температура пальцев рук 23–30°C) с использованием многофункционального лазерного неинвазивного диагностического комплекса (МЛНДК) «ЛАКК–М» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленного на рисунке 3 [11]. Данный комплекс предназначен для совместного исследования в одном диагностируемом объеме биоткани параметров ее жизнедеятельности (МТС) всеми рассмотренными выше неинвазивными оптическими методами (ЛДФ, ОТО, ПО, ФС).

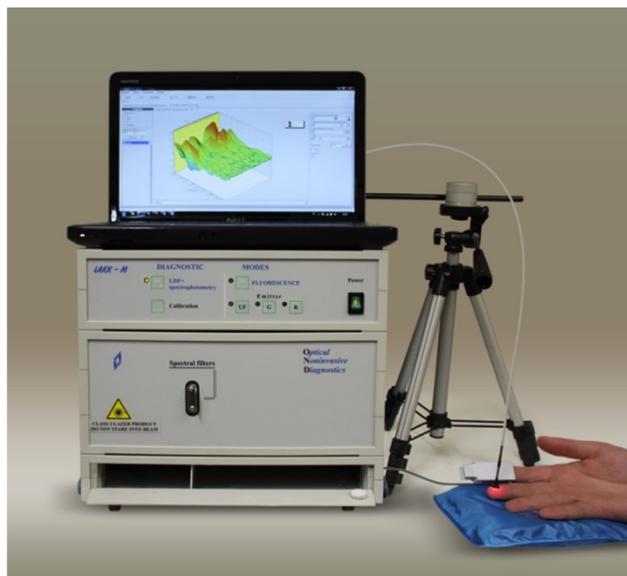


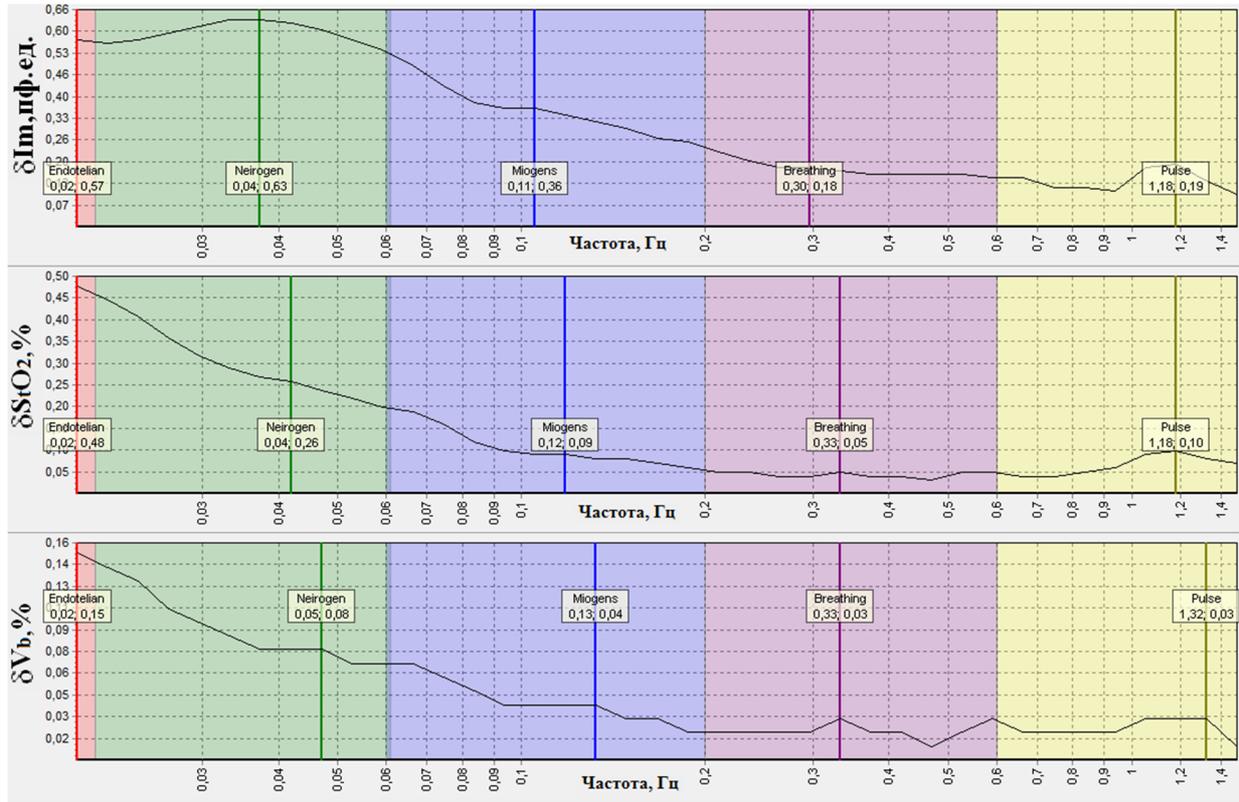
Рисунок 3 – Многофункциональный лазерный неинвазивный диагностический комплекс «ЛАКК–М»

Эксперимент заключался в регистрации базового теста ЛДФ– и ОТО–грамм длительностью 3 мин, измерение артериальной сатурации с помощью ПО и интенсивности флуоресценции биомаркеров (NADH, флавины) при помощи ФС, до и после применения ортопедического средства в двух областях биоткани правой руки: в области с артерио–венозными анастомозами (АВА) – мякиш среднего пальца, которая наиболее подвержена различным регуляторным механизмам, и в области без АВА на предплечье (на срединной линии на 3–4 см выше шиловидных отростков локтевой и лучевой костей), которая является менее чувствительной и характеризует, прежде всего, нутритивный кровоток. Измерения проводились в дневное время суток, в состоянии физического и психического покоя, с предварительной адаптацией испытуемого к температуре помещения 20–23 °С и регистрацией температуры области исследования. Всего было проведено 6 экспериментов (по 3 для каждой области исследований). Длительность применения ортопедического средства (время экспозиции) составляла 15 мин, длительность одного эксперимента с учётом всех измерений в 2–х областях – около 30 мин.

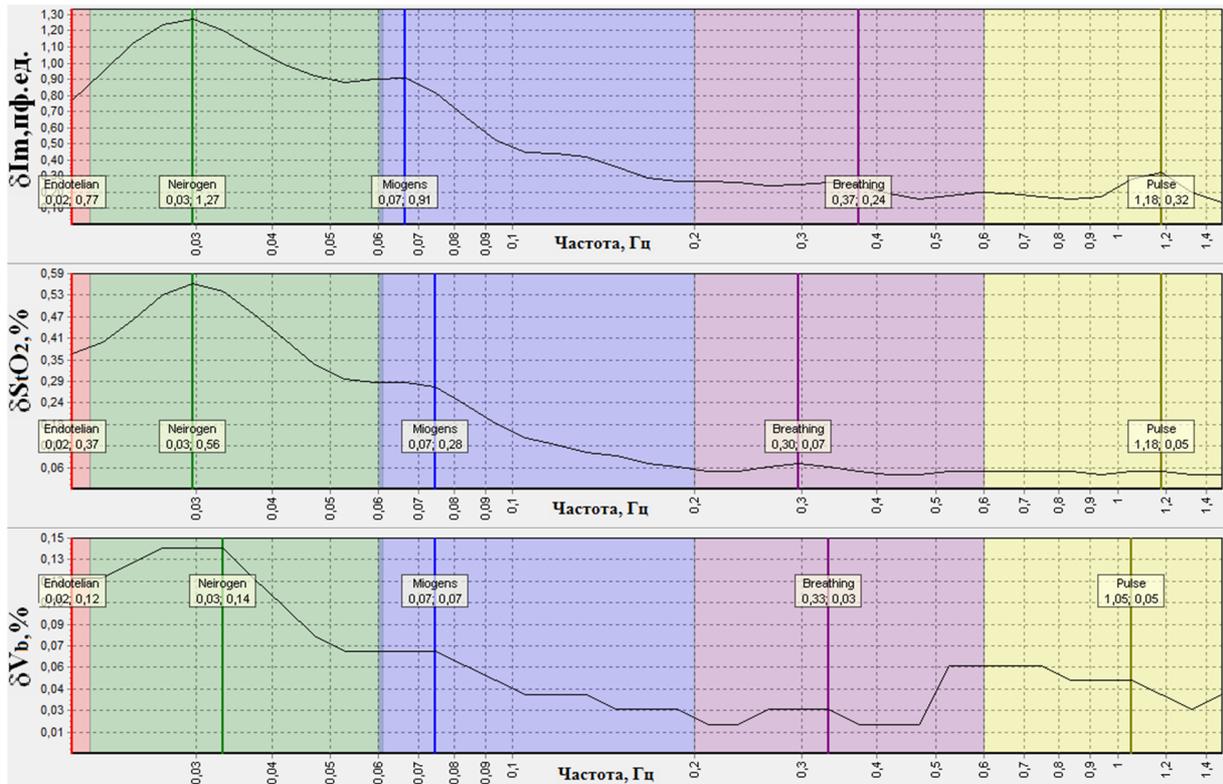
Таким образом, при проведении экспериментов производилась регистрация показателя микроциркуляции (I_m), тканевой сатурации (S_tO_2), уровня объёмного кровенаполнения (V_b), артериальной сатурации (S_aO_2) и амплитуд интенсивности флуоресценции коферментов биоткани (NADH и флавинов). С использованием встроенного программного обеспечения производился амплитудно–частотный анализ (непрерывное вейвлет–преобразование) ЛДФ– и ОТО–грамм [12]. Примеры амплитудно–частотного анализа ЛДФ– и ОТО–грамм до и после применения ортопедического средства приведены на рисунке 4.

На основании измеренных параметров производился расчет комплексных параметров МТС биотканей [13], таких, как: индекс относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке (S_m); индексы удельного потребления кислорода в ткани (U_1 , U_2); показатель тканевого кислородного метаболизма – редокс–отношение (RR), рассчитываемый как отношение амплитуд интенсивности флуоресценции NADH (диапазон длин волн флуоресценции 450–

460 нм) к флавинам (длины волн 530–550 нм). Пример регистрации спектра флуоресценции кожи на мякише среднего пальца правой руки приведён на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 4 – Примеры регистрации амплитудно – частотных спектров ЛДФ – и ОТО грамм до (а) и после (б) применения ортопедического средства

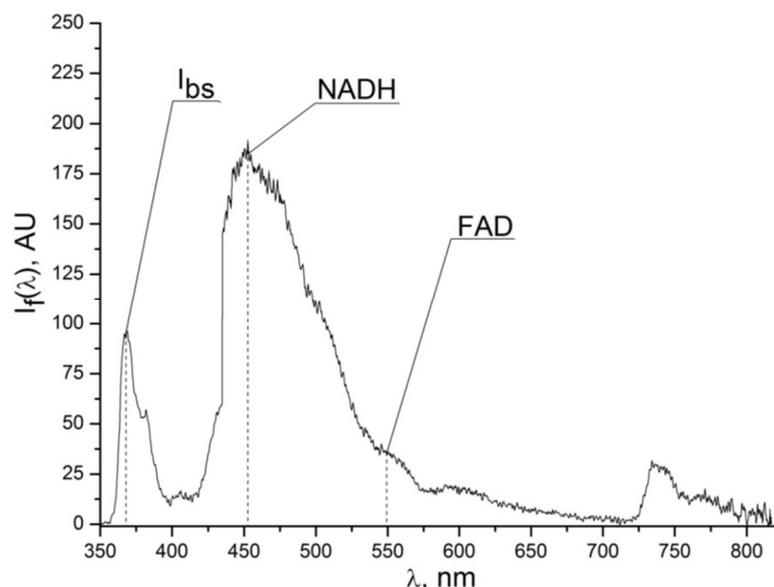


Рисунок 5 – Типовой вид регистрируемых спектров флуоресценции кожи на мякисе среднего пальца правой руки

В соответствии с методикой [14] производился расчет параметров тканевого дыхания, а именно – сатурации венозной крови (S_vO_2), показателя шунтирования (BI), величины нутритивного кровотока (I_{nutr}), показателя экстракции кислорода (OE) и скорости потребления кислорода (OC).

Для комплексной диагностики транспорта кислорода в МТС и его потребления тканями на основе всех 4-х применяемых методов (ЛДФ, ОТО, ПО, ФС) рассчитывалась эффективность кислородного обмена (ЭКО) [6]:

$$ЭКО = I_m \cdot U_1 \cdot RR, \quad (4)$$

где U_1 – индекс удельного потребления кислорода в ткани:

$$U_1 = (S_aO_2/S_vO_2). \quad (5)$$

Приведённые комплексные параметры являются более информативными характеристиками состояния МТС по сравнению с их оценкой отдельными методами, так как микроциркуляция значительно вариабельна и адаптируется под конкретные физиологические потребности ткани. Комплексный подход к исследованию ткани *in vivo* позволяет получать взаимодополняющие данные о микрогемодинамике, потреблении кислорода и состоянии обменных процессов для их анализа и принятия решений как по диагностике заболеваний, так и по эффективности их лечения и профилактики, например, с помощью ортопедического средства в виде варежки из микросфер.

Результаты экспериментальных исследований в виде измеренных и расчётных комплексных параметров МТС биотканей в двух областях (с АВА и без АВА) до и после применения ортопедического средства представлены в таблице 1.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что после применения ортопедического средства в области с АВА наблюдается тенденция к увеличению значения общей перфузии (6,1±2,3 пф.ед. и 11,8±4,4 пф.ед.), а также наблюдается уменьшение показателя шунтирования (5,1±1,3 отн.ед. и 3,5±0,8 отн.ед.), уровня венозной сатурации (67,2±1,8% и 66,5±4,3%) и увеличение нутритивного кровотока (1,4±0,9 пф.ед. и 3,3±0,6 пф.ед.), что может свидетельствовать о том, что большая часть кровотока движется в нутритивном русле, минуя шунтирующие сосуды.

Соответственно, увеличение кровотока в нутритивном русле приводит к увеличению скорости потребления кислорода (53,5±51,4 отн.ед. и 105,1±30,0 отн.ед.). Кроме того, из представленной таблицы видно, что применение ортопедического средства приводит к изменениям комплексных параметров МТС биотканей, а именно – снижению индекса относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке (14,0±4,2 отн.ед. и 7,7±3,3

отн.ед.) и увеличению эффективности кислородного обмена, что также свидетельствует о стимуляции процессов метаболизма в биотканях.

Таблица 1 – Результаты экспериментов с использованием ортопедического средства в виде варежки с микросферами.

| № п/п | Параметр | Область с АВА (n=3) | | Область без АВА (n=3) | |
|-------|---------------------|---------------------|------------|-----------------------|-----------|
| | | до | после | до | после |
| 1 | I_m , пф.ед. | 6,1±2,3 | 11,8±4,4 | 1,6±0,2 | 2,7±0,4 |
| 2 | S_tO_2 , % | 75,7±0,2 | 77,0±4,1 | 75,7±1,9 | 67,0±5,7 |
| 3 | V_b , % | 9,5±1,0 | 9,6±1,1 | 8,2±0,3 | 6,0±0,2 |
| 4 | S_aO_2 , % | 98±0,6 | 98±0,6 | 98±0,6 | 98±0,6 |
| 5 | BI , отн.ед. | 5,1±1,3 | 3,5±0,8 | 3,3±1,4 | 2,1±0,9 |
| 6 | S_vO_2 , % | 67,2±11,8 | 66,5±4,3 | 63,6±10,6 | 53,1±13,2 |
| 7 | I_{mnur} , пф.ед. | 1,4±0,9 | 3,3±0,6 | 0,6±0,2 | 1,7±1,0 |
| 8 | S_m , отн.ед. | 14,0±4,2 | 7,7±3,3 | 49,1±6,8 | 25,5±6,0 |
| 9 | U_1 , отн.ед. | 1,3±0,003 | 1,3±0,1 | 1,3±0,03 | 1,5±0,1 |
| 10 | U_2 , отн.ед. | 2,4±0,3 | 2,2±0,2 | 2,7±0,3 | 5,2±0,9 |
| 11 | RR , отн.ед. | 5,0±0,4 | 5,1±0,7 | 4,1±0,1 | 4,4±0,1 |
| 12 | OE , отн.ед. | 0,30±0,10 | 0,32±0,04 | 0,35±0,11 | 0,46±0,13 |
| 13 | OC , отн.ед. | 53,5±51,4 | 105,1±30,0 | 19,6±11,5 | 83,9±60,3 |
| 14 | $ЭКО$, отн.ед. | 89,5±38,9 | 98,4±39,2 | 8,8±1,3 | 14,4±4,0 |

Как показывают полученные данные, тенденция к изменениям параметров МТС биотканей наблюдается и для области без АВА, которые приводят к увеличению скорости потребления кислорода (19,6±11,5 отн.ед. и 83,9±60,3 отн.ед.). Данные изменения носят более выраженный характер, чем для области с АВА, что, вероятнее всего, связано с наличием у добровольца синдрома холодных рук, из этого следует, что при проведении экспериментальных исследований следовало в этом случае увеличить длительность применения ортопедического средства.

Таким образом, исходя из проанализированных первичных данных, можно сделать вывод о том, что применение ортопедического средства на основе микросфер приводит к улучшению кровотока и тканевого дыхания в целом. Использование оптических неинвазивных методов диагностики достаточно просто и наиболее достоверно позволяет оценивать эффективность применения ортопедических средств, а также индивидуализировать оптимальное время применения средства для обеспечения положительных результатов лечения и профилактики.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК» (№310) с использованием оборудования регионального центра коллективного пользования контрольно-измерительным оборудованием ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев, А.В. Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектродетекции в функциональной диагностике / А.В. Дунаев, Е.А. Жеребцов, А.И. Егорова, и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 6–2(284). – С. 96–100.
2. Руководство по реабилитации больных с двигательными нарушениями. Том. II / Под ред. А.Н. Беловой, О.Н. Щепетовой. – М.: Антидор, 1999. – 648 с.
3. Пат. № 2393752 Российская Федерация, МПК А 47 G 9/10. Ортопедическое устройство / Шураева Е.В., Семина Е.П.; заявитель и патентообладатель Шураева Е.В., Семина Е.П. – № 2009107363/14, заявл. 03.03.2009; опубл. 10.07.2010, Бюл. № 13. – 3 с.
4. Описание продукции для ортопедии фирмы «Альсария». – URL: <http://alsariya.com/svoystva/mikrosteklosfery/>.
5. Дунаев, А.В. Исследование возможностей лазерной доплеровской флоуметрии для оценки эффективности применения ортопедических средств / А.В. Дунаев, О.В. Иножарская, Е.В. Шураева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 5(289). – С. 114–120.

6. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно–тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.
7. Дунаев, А.В. Принципы построения тест–объекта для метрологического контроля состояния приборов лазерной доплеровской флоуметрии / А.В. Дунаев, Е.А. Жеребцов, Д.А. Рогаткин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 1. – С. 8–16.
8. Рогаткин, Д.А. Физические основы оптической оксиметрии. Лекция / Д.А. Рогаткин // Медицинская физика. – 2012. – № 2. – С. 97–114.
9. Шурыгин, И.А. Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия. – СПб: «Невский Диалект»; М.: «Издательство БИНОМ», 2000. – 301 с.
10. Рогаткин, Д.А. Физические основы лазерной клинической флуоресцентной спектроскопии in vivo. Лекция. // Медицинская физика. – № 4. – 2014. – С. 78–96.
11. Dunaev, A.V. Laser reflectance oximetry and Doppler flowmetry in assessment of complex physiological parameters of cutaneous blood microcirculation / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, N.A. Stewart, et al. // Proc. SPIE. – 2013. – V. 8572. – 857205.
12. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // Phys. Med. Biol. – 2013. – V. 53. – № 21. – p.p. 5967–5976.
13. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно–тканевых систем / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, и др. // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44–53.
14. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, et al. // Physiological Measurement. – 2014. – № 35(4). – p.p. 607–621.

Белых Павел Михайлович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК», г. Орёл,
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», сотрудник студенческого конструкторского бюро биомедицинских инженерных исследований (СКБ БМИИ) научно– образовательного центра «Биомедицинская инженерия»
Тел.: (4862) 41 98 76
E–mail: Belics–ru@yandex.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК», г. Орёл,
Ведущий научный сотрудник научно– образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: (4862) 41 98 76
E–mail: dunaev@bmcencenter.ru

Новикова Ирина Николаевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК», г. Орёл, Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», инженер–исследователь научно– образовательного центра «Биомедицинская инженерия»
Тел.: (4862) 41 98 76
E–mail: i.n_novikova@mail.ru

Шураева Елена Владимировна

ООО «Альсария», г. Орёл, Россия
Генеральный директор, врач терапевт
Тел.: (4862) 48 63 20
E–mail: alsariya@mail.ru

P.M. BELYKH, I.N. NOVIKOVA, A.V. DUNAEV, E.V. SHURAEVA

THE CONTROL OF THE EFFECTIVENESS OF ORTHOPAEDIC TOOL APPLICATION THROUGH THE ANALYSIS OF MICROCIRCULATORY–TISSUE SYSTEM PARAMETER CHANGES IN BIOTISSUE

This work is devoted to the assessment efficiency of application of orthopaedic tool. The article describes the methodology of experiments, the results of studies of changes of the parameters microcirculatory–tissue systems before and after use of orthopaedic tool and analyses of obtained data.

Keywords: laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry, pulse oximetry, fluorescence spectroscopy, microcirculatory–tissue system, orthopaedic tool.

BIBLIOGRAPHY

1. Dunayev, A.V. Issledovaniye vozmozhnostey teplovideniya i metodov neinvazivnoy meditsinskoy spektrofotometrii v funktsionalnoy diagnostike / A.V. Dunayev, Ye.A. Zherebtsov, A.I. Yegorova, i dr. // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 6–2(284). – P.P. 96–100.
2. Rukovodstvo po reabilitatsii bolnykh s dvigatelnyimi narusheniyami. Tom.II / Pod red. A.N. Belovoy, O.N. Shchepetovoy. – М.: Antidor, 1999. – 648 s.

3. Pat. № 2393752 Rossiyskaya Federatsiya, MPK A 47 G 9/10. Ortopedicheskoye ustroystvo / Shurayeva Ye.V., Semina Ye.P.; zayavitel i patentoobladatel Shurayeva Ye.V., Semina Ye.P. – № 2009107363/14, zayavl. 03.03.2009; opubl. 10.07.2010, Byul. № 13. – 3 s.
4. Opisaniye produktsii dlya ortopedii firmy «Alsariya». – URL: <http://alsariya.com/svoystva/mikrosteklosfery/>.
5. Dunayev, A.V. Issledovaniye vozmozhnostey lazernoy doplerovskoy floumetrii dlya otsenki effektivnosti primeneniya ortopedicheskikh sredstv / A.V. Dunayev, O.V. Inozharskaya, Ye.V. Shurayeva // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 5(289). – P.P. 114–120.
6. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013. – 496 s.
7. Dunayev, A.V. Printsipy postroyeniya test–ob»yekt dlya metrologicheskogo kontrolya sostoyaniya priborov lazernoy doplerovskoy floumetrii / A.V. Dunayev, Ye.A. Zherebtsov, D.A. Rogatkin // Biomeditsinskaya radioelektronika. – 2012. – № 1. – P.P. 8–16.
8. Rogatkin, D.A. Fizicheskiye osnovy opticheskoy oksimetrii. Lektsiya / D.A. Rogatkin // Meditsinskaya fizika. – 2012. – № 2. – P.P. 97–114.
9. Shurygin, I.A. Monitoring dykhaniya: pulsoksimetriya, kapnografiya, oksimetriya. – SPb: «Nevskiy Dialekt»; M.: «Izdatelstvo BINOM», 2000. – 301 s.
10. Rogatkin, D.A. Fizicheskiye osnovy lazernoy klinicheskoy flyuorestantsennoy spektroskopii in vivo. Lektsiya. // Meditsinskaya fizika. – № 4. – 2014. – P.P. 78–96.
11. Dunaev, A.V. Laser reflectance oximetry and Doppler flowmetry in assessment of complex physiological parameters of cutaneous blood microcirculation / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, N.A. Stewart, et al. // Proc. SPIE. – 2013. – V. 8572. – 857205.
12. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // Phys. Med. Biol. – 2013. – V. 53. – № 21. – p.p. 5967–5976.
13. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / A.V. Dunayev, I.N. Novikova, A.I. Zherebtsova, i dr. // Biotekhnosfera. – 2013. – № 5. – P.P. 44–53.
14. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, et al. // Physiological Measurement. – 2014. – № 35(4). – p.p. 607–621.

Belykh Pavel Mikhailovich

State University – ESPC, Orel,
Student of the Department «Instrument making, metrology and certification», a member of the Student Design Bureau of Biomedical Engineering Research Council (CSC BMII) scientific and educational center «Biomedical Engineering»
Tel.: (4862) 41 98 76
E-mail: Belics-ru@yandex.ru

Novikova Irina Nikolaevna

State University – ESPC, Orel,
Graduate student «Instrument making, metrology and certification», a research engineer scientific and educational center «Biomedical Engineering»
Tel.: (4862) 41 98 76
E-mail: i.n_novikova@mail.ru

Dunayev Andrey Valerievich

State University – ESPC, Orel,
Leading Researcher Research and Education Center «Biomedical Engineering», Ph.D., associate professor of «Instrument making, metrology and certification»
Tel.: (4862) 41 98 76
E-mail: dunaev@bmcencenter.ru

Shuraeva Elena Vladimirovna

LLC «Alsariya» Orel, Russia
CEO, therapists
Tel.: (4862) 48 63 20
E-mail: alsariya@mail.ru

Ю.Б. ИВАНОВ, Б.Р. ИВАНОВ

ФОТОДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВНЕШНЕЙ ЗАСВЕТКИ

Для компенсации влияния внешней засветки в фотодатчиках импульсного излучения, применяемых для контроля оптических параметров жидких сред, в медицинской физиотерапии и в охранных системах, предлагается использовать цепь обратной связи по постоянному току на основе полевых транзисторов, эффективность применения которых подтверждена результатами моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: фотоэлектрический контроль, фотодатчик, компенсация внешней засветки.

Фотодатчики импульсного излучения применяются для контроля жидких сред по оптическому пропусканию или поглощению инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения, в приборах медицинской физиотерапии, для бесконтактного контроля механических вибрационных колебаний, в системах охранной и пожарной сигнализации, в области лазерной фотометрии, в аппаратуре газовой и жидкостной хроматографии и т. п. [1 – 4].

Для повышения надежности контроля при наличии внешней засветки фотодатчиков и ограничения потребляемой мощности источников излучения в большинстве измерительных устройств модулируют световой поток и формируют импульсы излучения, для преобразования которых в напряжение применяют импульсные фотоприемники. Обычно в фотодатчиках применяются фотодиоды, служащие для получения фототока $I_{\text{ф}}$, пропорционального световому потоку Φ_x , который преобразуется в напряжение $U_{\text{вых}} = I_{\text{ф}} R_{\text{ос}}$ дифференциальным усилителем с резистором $R_{\text{ос}}$ в цепи отрицательной обратной связи [5, 6].

Такие устройства имеют одинаковую чувствительность к постоянному и к переменному оптическому излучению, что ограничивает их динамический диапазон и практическое использование при изменении уровня внешней засветки в широком диапазоне.

Применение усилителя с полосовым RC -фильтром в цепи отрицательной обратной связи позволяет селективно увеличить чувствительность к переменному излучению в узкой полосе частот, однако не дает существенного выигрыша в диапазоне преобразования импульсного излучения, который ограничивается влиянием внешней засветки, например, при наличии искусственного или солнечного освещения поверхности фотодиода [7].

Для расширения диапазона фотоэлектрического преобразования шунтируют фотодиод регулируемым сопротивлением на основе полевого транзистора, на затвор которого подается постоянное выходное напряжение фотодатчика [8]. Повышение яркости внешней засветки в таком устройстве приводит к уменьшению эквивалентного сопротивления $R_{\text{ос}}$ в цепи обратной связи усилителя, пропорционально которому снижается чувствительность к импульсному оптическому излучению, так как амплитуда импульсов напряжения на выходе фотодатчика прямо пропорциональна значению сопротивления $R_{\text{ос}}$.

Для разделения постоянной и переменной составляющих излучения в фотодатчиках иногда применяют интегратор, выходное напряжение которого подается через резистор обратной связи $R_{\text{ос}}$ для компенсации постоянного фототока $I_{\text{фп}}$ от влияния внешней засветки, а переменную составляющую усиливают дополнительным усилителем [9]. В этом случае на чувствительность фотодатчика к импульсному излучению влияет входное сопротивление дополнительного усилителя и сопротивление обратной связи $R_{\text{ос}}$, предельное значение которого ограничено уровнем постоянного фототока при максимальной яркости внешней засветки.

С учетом перечисленных вариантов построения фотодатчиков поставлена задача обеспечения высокой чувствительности фотодатчика к переменному или импульсному оптическому

излучению с автоматической компенсацией внешней засветки, превышающей в десятки–сотни раз уровень переменного оптического сигнала, и минимизации потребляемой мощности.

Одним из универсальных способов компенсации влияния внешней засветки является применение в схеме фотодатчика интегратора на микромощном усилителе, причем для уменьшения энергопотребления целесообразно использовать дифференциальный усилитель с однополярным напряжением питания [10, 11]. Кроме того, для повышения чувствительности фотодатчика к импульсному оптическому излучению целесообразно вводить положительную обратную связь по переменному току или применять дополнительный усилитель с отрицательной обратной связью для получения стабильного коэффициента усиления [12].

На основании таких рекомендаций разработан фотодатчик с регулируемым источником тока на полевом транзисторе, управляемым выходным сигналом интегратора для компенсации внешней засветки в широком диапазоне, схема которого показана на рисунке 1, а.

В этой схеме фотодиод $VD1$ служит для линейного преобразования потока излучения Φ_x в фототок, постоянная составляющая которого $I_{фп}$ через резистор R_1 поступает на вход усилителя $DA1$ с конденсатором C_2 в цепи обратной связи. Это приводит к возрастанию его выходного напряжения по линейному закону: $U_1(t) = I_{фп} t / C_2$. Напряжение с выхода интегратора через резистор R_2 подается на затвор полевого транзистора VT и изменяет его ток стока $I_{сп} \approx (U_1 + U_{отс} - U_{оп}) \cdot S / (1 + R_3 S)$, который зависит от напряжения отсечки $U_{отс}$, опорного напряжения $U_{оп}$, крутизны S вольтамперной характеристики полевого транзистора и сопротивления R_3 в цепи истока. Значение тока стока $I_{сп}$ регулируется выходным напряжением U_1 интегратора $DA1$ до его равенства постоянной составляющей фототока $I_{фп}$, т. е. до выполнения условия $I_{сп} \approx I_{фп}$. При этом темновой ток фотодиода $VD1$ и медленные изменения внешней засветки также компенсируются регулированием тока стока, поэтому обратное напряжение на фотодиоде $VD1$ остается равным опорному напряжению $U_{оп} \approx 1,5$ В даже при наличии внешней засветки, в сотни раз превышающей импульсное излучение.

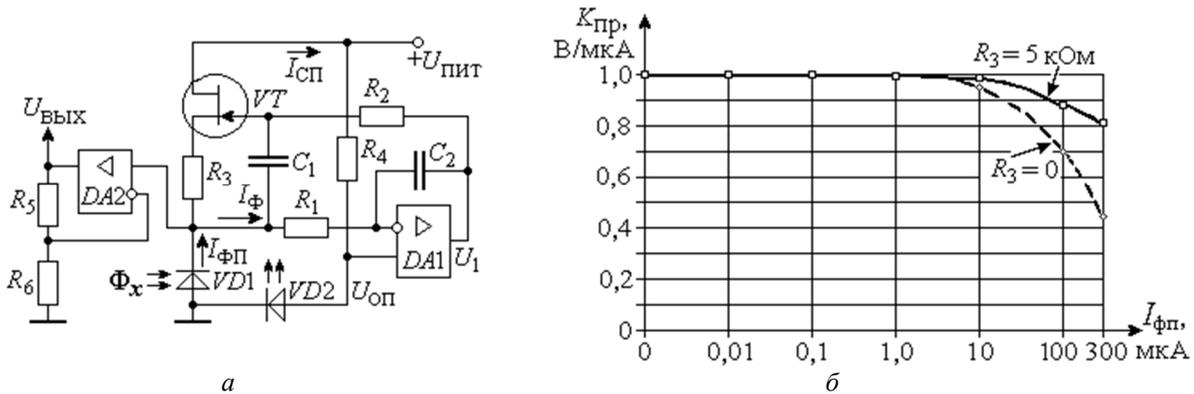


Рисунок 1 – Фотодатчик импульсного излучения с полевым транзистором: а – схема; б – зависимость коэффициента преобразования от фототока внешней засветки

Опорное напряжение $U_{оп} \approx 1,5$ В создается светодионом $VD2$ типа АЛ307, падение напряжения на котором стабилизируется при минимальном токе накачки $I_n = U_{пит} / R_3 \geq 4$ мкА. Применение источника опорного напряжения позволяет, во-первых, получить обратное напряжение смещения фотодиода для его работы в линейном режиме фотоэлектрического преобразования и, во-вторых, обеспечить работу усилителей $DA1$, $DA2$ с однополярным питанием на линейном участке амплитудной характеристики. По сравнению с низковольтным стабилизатором КС113, работающим только при минимальном токе стабилизации $I_{ст} \geq 3$ мА [13], применение стабилизатора напряжения на основе светодиода позволяет примерно на три порядка уменьшить ток, потребляемый от блока питания фотодатчика.

При появлении импульсного потока излучения Φ_x фотодиод $VD1$ вырабатывает импульсы фототока I_ϕ и напряжения U_ϕ , поступающие через конденсатор C_1 на затвор полевого транзистора, выполняющего функцию повторителя напряжения. Импульсы напряжения U_ϕ усиливаются в $K_U = (R_5 + R_6)/R_6$ раз усилителем $DA2$, и на выходе фотодатчика формируются импульсы с амплитудой $U_{\text{вых}}$, пропорциональные амплитуде импульсов фототока:

$$U_{\text{вых}} \approx I_\phi R_1 R_2 (R_5 + R_6) / R_6 (R_1 + R_2).$$

Высокая чувствительность схемы фотодатчика (рисунок 1, а) к импульсному излучению обеспечивается за счет применения конденсатора C_1 в цепи положительной обратной связи полевого транзистора по переменному току. При этом влияние внешней засветки на результат фотоэлектрического преобразования ослабляется примерно в $K_1 \geq 10^5$ раз интегратором $DA1$, входящим в общую цепь отрицательной обратной связи по постоянному току.

При экспериментальных исследованиях фотодатчика установлено, что реализация однополярных усилителей $DA1$, $DA2$ на микросхеме типа $TS942$ с малыми входными токами и общим током потребления $I_{\text{пит}} \approx 2,5$ мкА от источника напряжения питания $U_{\text{пит}} = 5$ В позволяет выполнять линейное преобразование импульсов оптического излучения в напряжение при работе в диапазоне частот до $f_{\text{max}} = 10$ кГц. При использовании высокоомных резисторов $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 1$ МОм типа $C2-29B$ с допуском 0,05 %, полевого транзистора типа $2N3370$ с напряжением отсечки $U_{\text{отс}} = 0,6$ В и резистором $R_3 = 5$ кОм в цепи истока транзистора обеспечивается высокая чувствительность и линейность характеристики преобразования фотодатчика с формированием импульсов выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 1$ В при максимальной амплитуде импульсов фототока $I_\phi = 1$ мкА.

Согласно результатам исследований, увеличение уровня внешней засветки приводит к снижению чувствительности или коэффициента преобразования фотодатчика относительно номинального значения, составляющего $K_{\text{пр}} = U_{\text{вых}}/I_\phi = 1$ В/мкА при нулевом значении постоянного фототока $I_{\text{фп}} = 0$ (рисунок 1, б). Установлено, что изменение постоянной составляющей фототока в диапазоне $I_{\text{фп}} = 10 \dots 100$ мкА уменьшает коэффициент преобразования соответственно на 3,4 ... 10,5 %, а при исключении сопротивления из цепи истока ($R_3 = 0$) чувствительность понижается соответственно на 4,4 ... 30,6 % (рисунок 1, б).

Дальнейшее увеличение резистора R_3 в схеме фотодатчика сужает диапазон компенсации влияния внешней засветки, поэтому в данной схеме применен резистор $R_3 = 5,1$ ком, позволяющий скомпенсировать постоянный фототок в диапазоне $0 \leq I_{\text{фп}} \leq 300$ мкА.

Для повышения стабильности коэффициента преобразования при различном уровне внешней засветки и ее компенсации в фотодатчике можно использовать МОП транзистор, управляемый выходным напряжением интегратора, включенного в цепь общей отрицательной обратной связи по постоянному току, схема которого приведена на рисунке 2, а.

В этом фотодатчике фотодиод $VD1$ формирует сумму постоянного $I_{\text{фп}}$ и импульсного I_ϕ фототока, которая преобразуется в напряжение $U_{\text{вых}}$ усилителем $DA1$ с резистором R_1 в цепи отрицательной обратной связи. Постоянная составляющая напряжения $U_{\text{вых}}$ интегрируется усилителем $DA2$ с конденсатором C_1 в цепи обратной связи, выходное напряжение которого $U_2(t) = I_{\text{фп}} R_1 t / R_2 C_1$ подается на МОП транзистор VT и регулирует его ток стока $I_{\text{сп}}$ для компенсации постоянной составляющей фототока $I_{\text{фп}}$, получаемого от фотодиода $VD1$.

При этом низкочастотные изменения интенсивности внешней засветки также ослабляются примерно в $K_2 \geq 10^5$ раз по сравнению с исследуемыми импульсами потока излучения Φ_x .

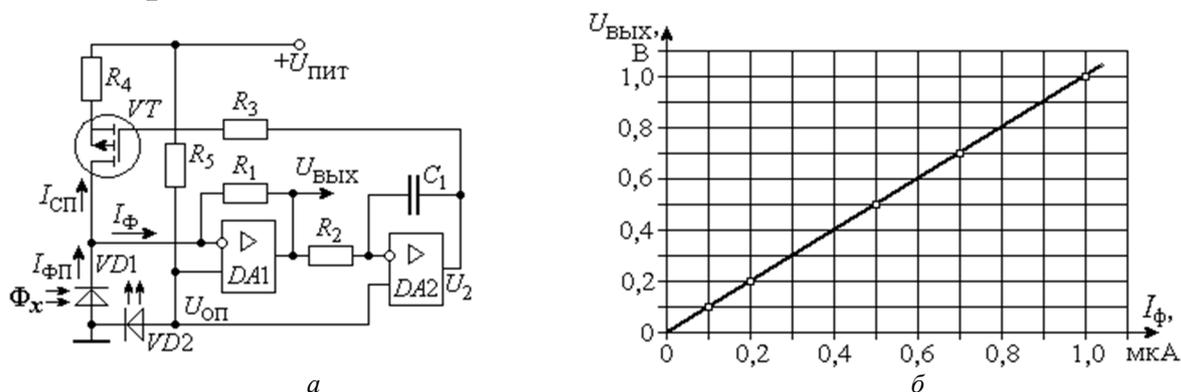


Рисунок 2 – Импульсный фотодатчик с компенсирующим МОП транзистором: а – схема фотодатчика; б – зависимость выходного напряжения от импульсов фототока

На выходе усилителя DA1 формируются импульсы напряжения $U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ф}} R_1$, пропорциональные амплитуде импульсов фототока $I_{\text{ф}}$, при этом увеличением сопротивления R_1 обеспечивается высокая чувствительность фотодатчика к импульсному излучению.

Применение МОП транзистора BST100 с пороговым напряжением $U_{\text{пор}} \leq 2,0$ В и двух усилителей на микросхеме TS942IN [14] позволяет скомпенсировать влияние внешней засветки в диапазоне постоянного фототока $0 \leq I_{\text{фп}} \leq 500$ мкА и напряжении питания фотодатчика $U_{\text{пит}} = +5$ В. Фотодатчик имеет линейную характеристику преобразования, и при выборе резисторов $R_1 = R_2 = 1$ МОм, $R_3 = 10$ кОм, $R_4 = 1$ кОм импульсы выходного напряжения составляют $U_{\text{ВЫХ}} = 1$ В при амплитуде импульсов фототока $I_{\text{ф}} = 1$ мкА (рисунок 2, б).

Энергопотребление фотодатчиков зависит от внешней засветки, и при изменении фототока в диапазоне $I_{\text{фп}} = (0 \dots 200)$ мкА ток потребления $I_{\text{пит}}$ возрастает от 9 до 212 мкА.

Данные фотодатчики обеспечивают расширение в сотни раз диапазона компенсации внешней засветки при сохранении высокой чувствительности к импульсному излучению и одновременной минимизации энергопотребления по сравнению с типовыми устройствами, применяемыми в современных системах фотоэлектрического контроля и автоматики [15, 16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, В.В. Информационные системы смотрящего типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков – М.: Логос, 2004. – 236 с.
2. Кашкаров, А.П. Датчики в электронных схемах / А. П. Кашкаров. – М.: Логос, 2013. – 200 с.
3. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 191 с.
4. Кашкаров, А.П. Фото- и термодатчики в электронных схемах / А.П. Кашкаров. – М.: Радио и связь, 2004. – 222 с.
5. Богданов, Н.Г. Способ повышения чувствительности фотоэлектрических преобразователей / Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов, Д.П. Санников // Телекоммуникации. – 2007. – № 2. – С. 35–38.
6. Фрайден, Д. Современные датчики. Справочник / Д. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
7. Пат. 2038574 Российская Федерация, МПК G01J1/44. Устройство обнаружения пламени / А.Г. Орбенко, С.А. Шляхтин; заявитель и патентообладатель Научное конструкторское бюро «Миус». – № 93000532/25; заявл. 06.01.1993; опубл. 27.06.1995, Бюл. № 12 – 3 с.
8. Пат. 2193761 Российская Федерация, МПК G01J1/44. Фотоприемное устройство / А.П. Плеханов; заявитель и патентообладатель Плеханов А.П. – № 2001124060/28; заявл. 29.08.2001; опубл. 27.11.2002, Бюл. № 5 – 3 с.
9. А.с. 1502967 СССР, МПК G01J1/44. Фотодатчик / Елисеев М.Ю. (СССР). – 4297969/29–25; заявлено 17.08.87; опубл. 23.08.89, Бюл. 31. – С. 2.
10. Богданов, Н.Г. Расширение динамического диапазона фотоэлектрических преобразователей / Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов, Е.Ю. Наумов // Телекоммуникации. – 2007. – № 7. – С. 41–44.
11. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. – М.: Логос, 2006. – 96 с.

12. Иванов, Б.Р. Повышение чувствительности датчиков автономных цифровых дозиметров / Б.Р. Иванов, Ю.Б. Иванов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 6–2. – С. 118–122.
13. Справочник по полупроводниковым диодам [Электронный ресурс] URL: cqham.ru/kozak/diodes/dih01.htm.
14. Каталог «Лаборатория электроники» [Электронный ресурс] URL: electronlab.ru/pi/products_id/107991.
15. Алейников, А.Ф. Датчики: перспективные направления развития / А.Ф. Алейников, В.А. Гридчин, М.П. Цапенко. – М.: Радио и связь, 2001. – 176 с.
16. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.

Иванов Юрий Борисович

Академия ФСО России, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
Тел. (4862) 49–88–21
E-mail: zhmur@yahoo.com

Иванов Борис Рудольфович

Академия ФСО России, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
Тел. (4862) 42–08–92
E-mail: brivanov@yandex.ru

Y.B. IVANOV, B.R. IVANOV

**PHOTOSENSORS TO CONTROL PULSED LUMINOUS FLUX
WITH AMBIENT LIGHT COMPENSATION**

For ambient light compensation into photo sensors of pulsed luminous flux used to control optical parameters of liquid media, medical and security systems, proposes to use DC-feedback circuit based in MOSFET, the efficiency of which is confirmed by results of simulations and experiments.

Keywords: photoelectric control, photo sensor, ambient light compensation.

BIBLIOGRAPHY

1. Tarasov, V.V. Informatsionnyye sistemy smotryashchego tipa / V.V. Tarasov, YU.G. Yakushenkov – М.: Logos, 2004. – 236 с.
2. Kashkarov, A.P. Datchiki v elektronnykh skhemakh / A. P. Kashkarov. – М.: Logos, 2013. – 200 с.
3. Vigleb, G. Datchiki. Ustroystvo i primeneniye / G. Vigleb. – М.: Mir, 1989. – 191 с.
4. Kashkarov, A.P. Foto- i termodatchiki v elektronnykh skhemakh / A.P. Kashkarov. – М.: Radio i svyaz, 2004. – 222 с.
5. Bogdanov, N.G. Sposob povysheniya chuvstvitelnosti fotoelektricheskikh preobrazovateley / N.G. Bogdanov, YU.B. Ivanov, D.P. Sannikov // *Telekommunikatsii*. – 2007. – № 2. – С. 35–38.
6. Frayden, D. Sovremennyye datchiki. Spravochnik / D. Frayden. – М.: Tekhnosfera, 2005. – 592 с.
7. Pat. 2038574 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01J1/44. Ustroystvo obnaruzheniya plameni / A.G. Orobenko, S.A. Shlyakhtin; zayavitel i patentoobladatel Nauchnoye konstruktorskoye byuro «Mius». – № 93000532/25; zayavl. 06.01.1993; opubl. 27.06.1995, Byul. № 12 – 3 с.
8. Pat. 2193761 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01J1/44. Fotopriyemnoye ustroystvo / A.P. Plekhanov; zayavitel i patentoobladatel Plekhanov A.P. – № 2001124060/28; zayavl. 29.08.2001; opubl. 27.11.2002, Byul. № 5 – 3 с.
9. A.s. 1502967 SSSR, MPK G01J1/44. Fotodatchik / Yeliseyev M.Yu. (SSSR). – 4297969/29–25; zayavleno 17.08.87; opubl. 23.08.89, Byul. 31. – S. 2.
10. Bogdanov, N.G. Rasshireniye dinamicheskogo diapazona fotoelektricheskikh preobrazovateley / N.G. Bogdanov, YU.B. Ivanov, Ye.Yu. Naumov // *Telekommunikatsii*. – 2007. – № 7. – С. 41–44.
11. Kotyuk, A.F. Datchiki v sovremennykh izmereniyakh / A.F. Kotyuk. – М.: Logos, 2006. – 96 с.
12. Ivanov, B.R. Povysheniye chuvstvitelnosti datchikov avtonomnykh tsifrovyykh dozimetров / B.R. Ivanov, Yu.B. Ivanov // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2011. – № 6–2. – С. 118–122.
13. Spravochnik po poluprovodnikovym diodam [Elektronnyy resurs] URL: cqham.ru/kozak/diodes/dih01.htm.
14. Katalog «Laboratoriya elektroniki» [Elektronnyy resurs] URL: electronlab.ru/pi/products_id/107991.
15. Aleynikov, A.F. Datchiki: perspektivnyye napravleniya razvitiya / A.F. Aleynikov, V.A. Gridchin, M.P. Tsapenko. – М.: Радио и связь, 2001. – 176 с.
16. Dzhekson, R.G. Noveyshiye datchiki / R.G. Dzhekson. – М.: Tekhnosfera, 2007. – 384 с.

Ivanov Yuriy Borisovich

The Academy of the Federal security service of Russia,
Orel
Ph.D., associate Professor of department
Ph.: (4862) 49–88–21
E-mail: zhmur@yahoo.com

Ivanov Boris Rudolfovich

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation,
Orel
Ph.D., Professor of department
Ph.: (4862) 42–08–92
E-mail: brivanov@yandex.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ

УДК 621.646.98

Е.В. ПЛАХОТНИКОВА, В.Б. ПРОТАСЬЕВ

ЗАКОН СОВМЕСТИМОСТИ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМ «ЭЛЕКТРОПРИВОД – ЗАПОРНАЯ АРМАТУРА» НА ПУТИ К ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЮ

В статье приведено математическое обоснование законов совместимости электропривода и запорной арматуры в рамках единой системы. Выявленные, путем структурного и функционального моделирования зависимости, позволяют снизить рассогласованность системы «электропривод – запорная арматура» с учетом конструктивных характеристик ее элементов, поясняя тенденции повышения качества отечественной продукции указанного типа. Приведенные авторами методика и алгоритмы могут быть использованы при проектировании отечественных систем обеспечения безопасности трубопроводного транспорта, включающих: асинхронный электродвигатель, червячный редуктор и запорную арматуру с прямолинейным перемещением запорного органа.

Подход, представленный в работе, может быть интересен для широкого сектора отечественной промышленности, ориентированного на производство конкурентоспособной продукции, проектирование которой требует интеграции различных технических элементов для реализации единой целевой функции.

Ключевые слова: *качество, конкурентоспособность, импортозамещение, структурное и функциональное описание систем «электропривод – запорная арматура».*

На многих машиностроительных предприятиях России сложилась ситуация, когда из деталей и комплектующих, приобретенных в зарубежных странах, выполняется так называемая «отверточная сборка» [1–5].

С позиции поставленной президентом страны В.В. Путиным задачи импортозамещения эта ситуация негативна не только потому, что поставки необходимых для сборки элементов могут прекратиться в любой момент по желанию зарубежных партнеров, но и тем, что сборочные заводы часто знают только выходные характеристики собираемой продукции, но не обладают методиками расчета этих характеристик – зарубежные фирмы не стремятся раскрывать свои секреты.

Такие сборочные предприятия обречены на выпуск конкурентно невыгодной продукции. Технологическое отставание отечественного производства носит отложенный характер, например, до очередных санкций.

Поэтому развитие отечественного наукоемкого производства является основой технологической безопасности и независимости страны [6], а санкции и различные экспортные ограничения, в отношении многих отраслей России, должны стать не только стимулом, а и стартом для неотложного создания новых импортозамещающих производств [7].

Аналогичная ситуация сложилась и на арматуростроительных предприятиях, выполняющих сборку систем «электропривод – запорная арматура», в том числе из зарубежных деталей и комплектующих.

В данной статье приведен силовой расчет таких систем и сформулированы основные требования к их отдельным элементам.

Практика эксплуатации систем «электропривод – запорная арматура» показывает, что цикл закрытия является наиболее важным, поэтому только он рассматривается с необходимой подробностью, а цикл открытия как менее нагруженный далее не рассматривается.

Расчетная схема системы «электропривод – запорная арматура» приведена на рисунке 1, где в качестве запорной арматуры, условно представлен запорный клапан – арматура с прямолинейным перемещением запорного органа наиболее часто используемая на трубопроводном транспорте, где время срабатывания является определяющим фактором ее дальнейшей безопасной эксплуатации.

Рассмотрим принцип работы представленных систем. Асинхронный электродвигатель 1, через муфту 2 соединен с червяком 3, который установлен на валу 4 на скользящей шпонке с возможностью осевого перемещения. Своим торцом червяк 3 опирается на пружину 5 через опорный подшипник (на рисунке 1 не показан).

Червячное колесо 6 соединено с ходовым винтом 7, который перемещает клапан 8 до соприкосновения с седлом 9.

При контакте клапана с седлом пружина 5 сжимается на величину X_0 (рисунок 1, б) и ее усилие сжатия P_t обеспечивает прижатие контактирующих элементов друг к другу с усилием $P_{зак}$, обеспечивающим герметичность соединения под заданным давлением транспортируемой среды.

Под действием застопоренного червячного колеса 6 червяк 3 перемещается вдоль вала 4 и сжимает пружину 5. При достижении заданного крутящего момента $M_{х.в.}$, соответствующего сжатию пружины X_0 (рисунок 1, б) датчик 11 подает сигнал на выключатель 12, далее срабатывает пусковое устройство (ПУ) 13 и двигатель 1 отключается.

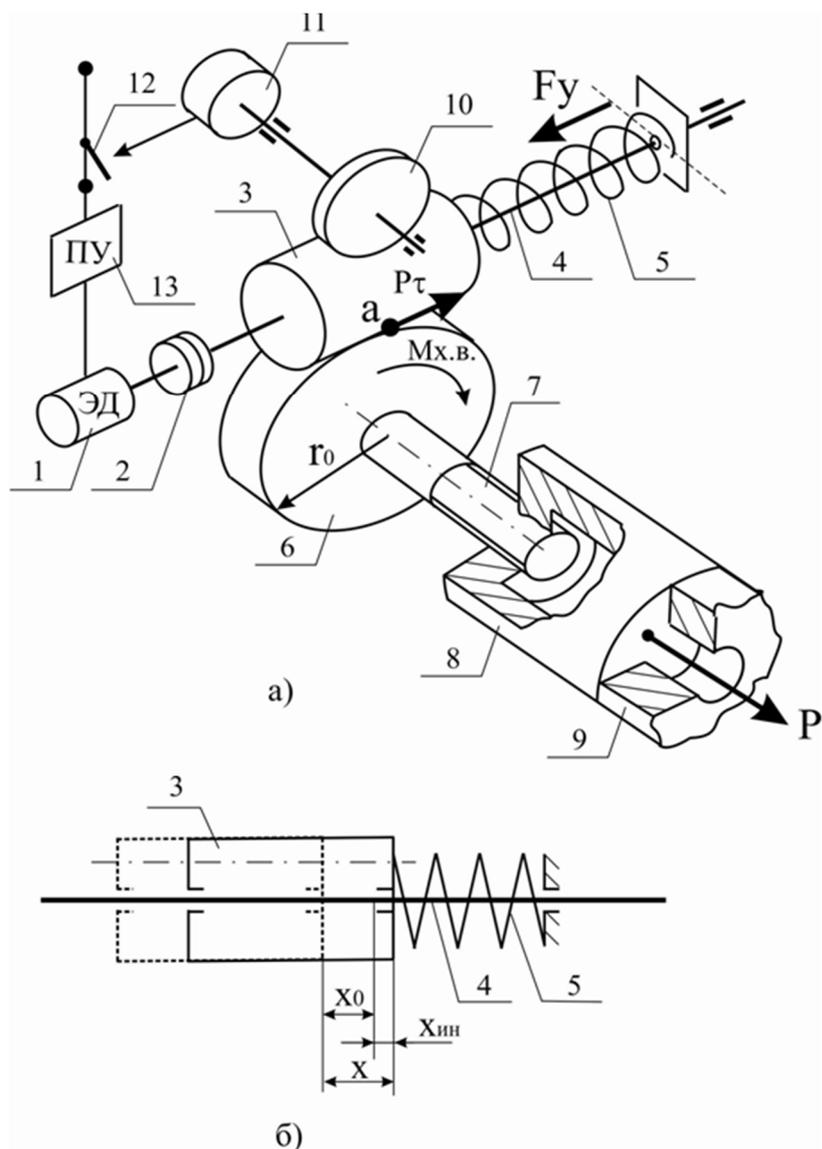


Рисунок 1 – Расчетная схема системы «электропривод – запорная арматура»

В момент остановки электродвигателя подвижные элементы системы совершают инерционный выбег, и при этом пружина 5 дополнительно сжимается на величину $X_{ин}$, а момент $M_{х.в.}$ и соответственно усилие запирания возрастает относительно настроечных значений.

Судя по публикациям [8–10] инерционные эффекты, создающие дополнительные крутящие моменты при закрытии в расчетах подобных систем не учитываются и основная цель настоящей работы – устранить этот очень существенный недостаток, который снижает качество, а как следствие и конкурентоспособность отечественной продукции.

Проанализируем подробно кинематику системы, показанной на рисунке 1.

В точке a (рисунок 1, а; 2) кинематическая энергия двигателя $E_{кин}$ разделяется на два параллельных потока, один из них $E_{кин1}$ после соприкосновения клапана с седлом, начинает сжимать пружину, которая при статической настройке привода сжимается на величину X_0 , а при полной остановке ЭД на величину X , причем $X > X_0$ (рисунок 2).

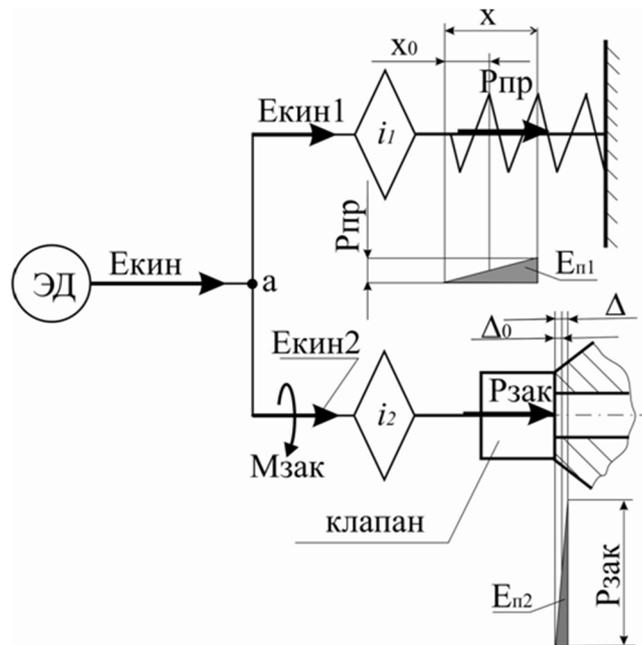


Рисунок 2 – Структурная схема системы «электропривод – запорная арматура»

Второй поток энергии $E_{кин2}$ реализуется в крутящий момент $M_{зак}$ и он закрывает клапан при статической настройке с деформацией Δ_0 , а при полной остановке с деформацией Δ (рисунок 2).

В точке a усилие P_t одинаковы для обоих потоков, поэтому можно считать, что потоки $E_{кин1}$ и $E_{кин2}$ без учета к.п.д. равны друг другу:

$$E_{кин1} = E_{кин2} \tag{1}$$

Исходя из формулы (1) потенциальная энергия сжатой пружины $E_{п1}$ и закрытого запорного органа клапана $E_{п2}$ тоже равны друг другу и это равенство можно записать следующим уравнением:

$$\sigma_{пр} \cdot X^2 = \sigma_{кл} \cdot \Delta^2 \tag{2}$$

где $\sigma_{пр}$ – жесткость пружины;
 $\sigma_{кл}$ – жесткость клапана.

Равенство в уравнении(2) может нарушаться, погрешностьюнастройки или неправильно выбранной жесткостью $\sigma_{пр}$ и $\sigma_{кл}$ [11], и это является источником снижения надежности и потенциальных аварий [8], ввиду совмещения элементов системы без учета согласования выходных силовых характеристик и номинальных характеристик заданных при настройке [12].

Следует отметить, что указанное рассогласование можно, при наличии расчётных методик, использовать как резерв мощности, что позволит повысить безопасность эксплуатации систем «электропривод – запорная арматура» и их качество.

Установленные зависимости (1–2), позволяют сделать вывод, что судить о расходе энергии на запорной арматуре (клапане) можно по динамике поведения пружины, т.е. величинам ее деформации: X , X_0 и $X_{ин}$, что требует разработки соответствующей методики.

Для разработки такой методики допустим, что экспериментально или расчетным путем усилие закрытия клапана $P_{зак}$ определено.

Величина $P_{зак}$ связана с усилием пружины $P_{пр}$ зависимостью:

$$P_{зак} = \frac{P_{пр} \cdot r_0 \cdot \eta}{r_{х.в} \cdot tg \gamma \cdot n} \quad (3)$$

где $r_0 = m \cdot z$ – делительный радиус червячного колеса;
 m, z – соответственно модуль и число зубьев червячного колеса;
 $r_{х.в}$ – средний радиус резьбы ходового винта;
 γ – угол подъема ходового винта по среднему диаметру;
 η – к.п.д. привода;
 n – коэффициент запаса.

В соответствии с формулой (3), при известном значении $P_{зак}$, усилие пружины $P_{пр}$ можно рассчитать как:

$$P_{пр} = \frac{P_{зак} \cdot r_{х.в} \cdot tg \gamma \cdot n}{r_0 \cdot \eta} \quad (4)$$

На рисунке 1 показано, что поступательное перемещение червяка 3 через колесо 10 передается на датчик 11. Малые перемещения X (рисунок 1, б) негативно скажутся на точности измерений, поэтому предлагается назначить значение X , соответствующее закрытию клапана, что позволит рассчитать жесткость пружины $\sigma_{пр}$:

$$\sigma_{пр} = \frac{P_{пр}}{X} \quad (5)$$

В соответствии с расчетной схемой приведенной на рисунке (рисунок 1, б), деформация пружины X является суммой деформаций X_0 , соответствующей статической настройке, обеспечиваемой работающим электродвигателем и деформации $X_{ин}$ которая соответствует торможению двигателя от ω_n (номинальной угловой скорости) до полной остановки ($\omega_n=0$).

Пренебрегая сжатием пружины при холостом ходе, уравнение баланса энергий можно представить зависимостью:

$$E_{\Sigma} = E_0 + E_{ин} \quad (6)$$

где E_{Σ} – суммарная энергия, расходуемая на выполнение рабочего цикла закрытие;
 E_0 – энергия обеспечиваемая работающим ЭД;
 $E_{ин}$ – энергия инерции останавливающейся системы.

Графическое пояснение уравнения (6) представлено на расчетной схеме (рисунок 3).

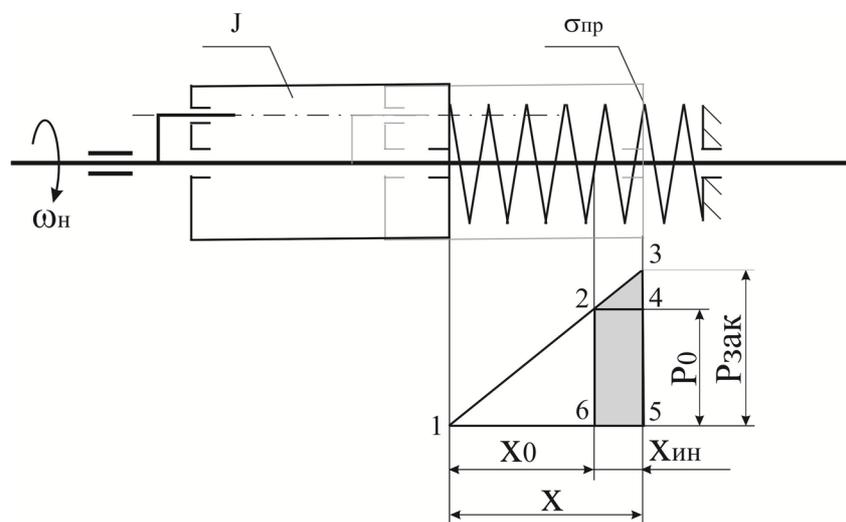


Рисунок 3 – Схема для расчета энергий, затрачиваемых на закрытие клапана

Для сжатой пружины, энергия E_0 будет условно равна площади треугольника $\Delta 126$ (рисунок 3):

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\text{пр}} \cdot X_0^2. \quad (7)$$

Величина $E_{\text{ин}}$, в соответствии со схемой (рис.3), равна площади трапеции (2–3–5–6):

$$E_{\text{ин}} = \frac{1}{2} \omega_n^2 \cdot J = P_0 \cdot X_{\text{ин}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\text{пр}} \cdot X_{\text{ин}}^2, \quad (8)$$

где усилие P_0 определяется зависимостью:

$$P_0 = \sigma_{\text{пр}} \cdot X_0 = \sigma_{\text{пр}} \cdot (X - X_{\text{ин}}). \quad (9)$$

Опуская промежуточные преобразования с учетом формулы (9) из формулы (8) выразим значение $X_{\text{ин}}$:

$$X_{\text{ин}} = \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot X - \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 \cdot X^2 - \sigma_{\text{пр}} \cdot \omega_n^2 \cdot J}}{\sigma_{\text{пр}}}. \quad (10)$$

Считая значение X известной величиной, можно определить значения $X_{\text{ин}}$ и X_0 , что позволит обеспечить баланс энергий при закрытии клапана, поскольку точно так же, но с учетом к.п.д. и коэффициента запаса n , энергия распределяется на клапане.

$$\Delta_{\text{ин}} = \frac{\sigma_{\text{кл}} \cdot \Delta - \sqrt{\sigma_{\text{кл}}^2 \cdot \Delta^2 - \sigma_{\text{кл}} \cdot \omega_n^2 \cdot J}}{\sigma_{\text{кл}}}. \quad (11)$$

Учитывая равенство энергий, затрачиваемых на сжатие пружины и закрытие клапана, справедливо выражение:

$$\sigma_{\text{пр}} \cdot X^2 = \frac{\sigma_{\text{кл}} \cdot \Delta^2 \cdot n}{\eta}. \quad (12)$$

Иными словами, жесткость клапана должна согласовываться с жесткостью пружины:

$$\sigma_{\text{кл}} = \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot X^2 \cdot \eta}{\Delta^2 \cdot n}. \quad (13)$$

Очевидно, что при жесткости клапана больше расчетной величины, полученной по формуле (13) система не будет воспринимать часть энергии, а при обратной ситуации клапан не закроется с нужным усилием при расчетных настроечных характеристиках X_0 и $X_{\text{ин}}$.

Обе ситуации недопустимы и показывают, что функциональная совместимость элементов не обеспечена.

Анализ выражений (10) и (11), позволяет определить теоретическую возможность различных вариантов работы систем «электропривод – запорная арматура», графическое пояснение которых приведено на рисунке 4.

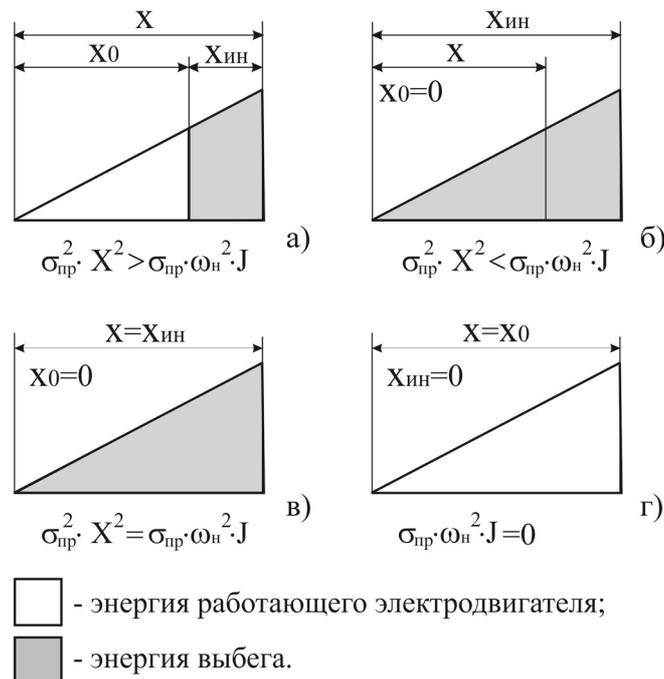


Рисунок 4 – Варианты распределений энергий в системе «электропривод – запорная арматура»

Первый вариант (рисунок 4, а) характеризует систему при сбалансированном использовании энергии. График построен с учетом условия, что подкоренное выражение в формуле (10) является положительной величиной:

$$\sigma_{\text{пр}}^2 \cdot X^2 > \sigma_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{н}}^2 \cdot J. \quad (14)$$

Второй (рисунок 4, б) и третий (рисунок 4, в) варианты отображают системы баланс энергий, в которых не достигнут.

Так, второй вариант (рисунок 4,б) определяет систему с избыточной кинетической энергией, а третий вариант (рисунок 4, в) определяет систему, где используется только кинетическая энергия.

Четвертый вариант (рисунок 4, г) определяет систему, в которых инерционная составляющая отсутствует, что возможно только при использовании безынерционных электродвигателей, например шаговых широко применяемых в станках с ЧПУ.

В качестве пояснения, приведем пример применения предложенных зависимостей, для системы «электропривод – запорная арматура» со следующими техническими характеристиками:

- приведенный момент инерции: $J=4,5 \cdot 10^{-4}$ [кг·м²];
- делительный радиус червячного колеса: $r_0 = 80$ [мм];
- средний радиус резьбы ходового винта: $r_{\text{х.в}} = 20$ [мм];
- угол подъема ходового винта по среднему диаметру: $\gamma=2,73$ [град];
- коэффициент полезного действия электропривода: $\eta=0,7$;
- коэффициент запаса: $n=1.25$;
- шаг ходового винта: $t_{\text{х.в}} = 6$ [мм];
- усилие закрытия: $P_{\text{зак}} = 20000$ [Н];
- частота вращения выходного вала электропривода: $n_{\text{н}} = 1450$ [мин⁻¹].

Произведем расчет требуемых параметров для выбранной системы:

1. Определим усилие на пружине:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{зак}} \cdot n \cdot \text{tg} \gamma \cdot r_{\text{х.в}}}{r_0 \cdot \eta} = \frac{20000 \cdot 1.25 \cdot \text{tg} 2.73^\circ \cdot 20}{80 \cdot 0.7} = 425.74 \text{ [Н];}$$

2. Выберем величину полного сжатия пружины, например $X=30$ [мм]. Такая величина X позволит создать условия для точной работы датчика перемещения (рисунок 1, позиция 11).

3. Определим требуемую жесткость пружины:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пр}}}{X} = \frac{425.74}{30} = 14.19 \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}} \right];$$

4. Определим энергию, затрачиваемую на сжатие пружины:

$$E_{\Sigma} = \sigma_{\text{пр}} \cdot X^2 = 14.19 \cdot 0.03^2 = 12.77 \text{ [Н} \cdot \text{м]} = 12.77 \text{ [Дж];}$$

5. Рассчитаем сжатие пружины при инерционном выбеге (формула 10):

$$X_{\text{ин}} = \frac{14191 \cdot 0.03 - \sqrt{14191^2 \cdot 0.03^2 - 14191 \cdot 150^2 \cdot 4.5 \cdot 10^{-4}}}{14191} \approx 0.0167 \text{ [м]}$$

6. Определим кинетическую энергию выбега, соответствующую сжатию пружины $X_{\text{ин}}$ по формуле (8):

$$E_{\text{ин}} = \frac{1}{2} \cdot 150^2 \cdot 4.5 \cdot 10^{-4} = 5.06 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} \right] = 5.06 \text{ [Дж]}$$

7. Рассчитаем энергию работающего двигателя E_0 :

$$E_0 = E_{\Sigma} - E_{\text{ин}} = 12.77 - 5.06 = 7.71 \text{ [Дж]}$$

Баланс энергетических затрат на закрытие системы «электропривод – запорная арматура» показан в виде столбчатой диаграммы на рисунке 5.

8. Определим деформацию клапана Δ_{Σ} , используя кинематическую цепь (рисунок 1), соответствующую деформации пружины на величину X :

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{X \cdot t_{x.v}}{r_0 \cdot 2\pi} = \frac{30 \cdot 6}{80 \cdot 2\pi} = 0.358 \text{ [мм]} \quad (15)$$

9. Рассчитаем жесткость клапана, соответствующую деформации Δ_{Σ} :

$$\sigma_{\text{кл}} = \frac{P_{\text{зак}}}{\Delta_{\Sigma}} = \frac{20000}{0.358} = 55865 \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}} \right] \quad (16)$$

Если система «электропривод – запорная арматура» соответствует приведенным в примере данным, её можно считать в максимально доступной степени согласованной и, как следствие, обладающей высоким уровнем качества и конкурентоспособности.

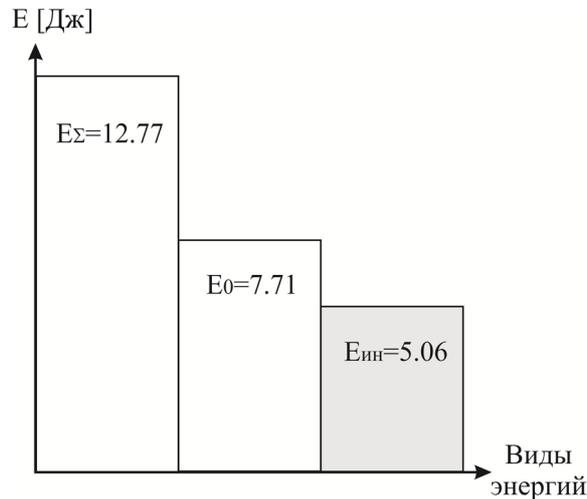


Рисунок 5 – Баланс энергетических затрат на закрытие системы «электропривод – запорная арматура»

В практике производства систем «электропривод – запорная арматура» сложилась ситуация, когда при их настройке измеряется не усилие закрытия $P_{\text{зак}}$, а момент $M_{x.v.}$, действующий на ходовом винте (рисунок 1, а).

Не вдаваясь в причины этой ситуации, которую нельзя оценивать положительно, определим моменты $M_{x.v.}$ соответствующие настройке M_0 и окончательному закрытию клапана $M_{\text{зак}}$.

В соответствии с рисунком 1 получим:

$$M_{\text{зак}} = \frac{P_{\text{зак}} \cdot t g \gamma_2 \cdot r_{x.v.}}{\eta} \quad (17)$$

$$M_0 = \frac{P_0 \cdot t g \gamma_2 \cdot r_{x.v.}}{\eta} \quad (18)$$

Для упрощения введем в уравнения (17, 18) замену: $t g \gamma_2 \cdot r_{x.v.} \cdot \eta = K$, данная величина, завися от конструктивных параметров системы, является ее постоянной характеристикой.

Уравнения (17, 18) примут вид:

$$M_{\text{зак}} = P_{\text{зак}} \cdot K \quad (19)$$

$$M_0 = P_0 \cdot K \quad (20)$$

Из полученных уравнений (19, 20) следует, что обеспечить согласование рассматриваемых систем без учета характеристик электропривода влияние, которого было установлено в результате составления баланса энергий, совмещением элементов только по статической настройке системы, без учета индивидуальных качественных характеристик отдельно взятой совмещаемой единицы – не представляется возможным.

Применение разработанной методики и реализация представленного алгоритма позволят снизить мощностные и весогабаритные характеристики систем «электропривод – запорная арматура», обосновать рациональные варианты совмещения ее элементов, обеспечивая качество и конкурентоспособность продукции на пути реализации приоритетного направления России в части импортозамещения.

Следует отметить, что проблема обеспечения совместимости характерна не только для систем «электропривод – запорная арматура». Приведенный пример, являясь частным случаем, но описывает общую проблему отечественной машиностроительной промышленности.

Современная промышленность характеризуется многообразием сложных технических систем, интегрирующих элементы различного целевого назначения, для реализации единой целевой функции. Качество таких систем зависит не только от качества отдельных элементов, но и от совокупности качественных характеристик определяемых их совместимостью. В условиях насыщенности отечественного рынка западными, на первый взгляд более конкурентоспособными аналогами, не имеющими четкой номенклатуры технических характеристик, позволяющих оценить эффективность их интеграции, препятствует развитию отечественной промышленности. Зависимость от западных поставщиков, в сложившейся политической ситуации является недопустимой ошибкой.

Подводя итог, следует еще раз отметить, что на пути импортозамещения приоритетным направлением повышения качества является не только обеспечение согласования при совместимости элементов технических систем, но и обеспечения согласования различных машиностроительных сегментов, которые располагая достаточным опытом и технологическим обеспечением, позволят вывести отечественную продукцию на независимый, высококачественный и конкурентоспособный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу об отверточной сборке и локализации производства. URL: <http://www.sdelanounas.ru/blogs/8865>.
2. Барышникова, Н. Уход от «отверточной технологии» / Н. Барышникова // Торгово-промышленные ведомости. – URL: http://www.tpp-inform.ru/analytic_journal/4998.html.
3. Одесс, В. Ценностной фактор – важнейший элемент конкурентоспособности продукции, реализуемой на товарном рынке / В. Одесс // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2011. – № 2. – С. 184–185.
4. Фаличев, О. Черная метка «отверточной сборке» // Военно-промышленный курьер (ВПК). – № 44(461).
5. Отверточная сборка в России – панацея или заблуждение. – URL: <http://www.poletim.net/news/otvertochnaya-sborka-v-rossii-panacea-ili-zabluzhzh>.
6. Степанова, Е.Ю. Наукоемкие отрасли и высокие технологии – основа технологической безопасности и независимости страны / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2. – С. 122 – 132.
7. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3. – С. 96 – 103.
8. Шпаков, О.Н. О расчетах нагрузок в электроприводной арматуре / О.Н. Шпаков // Арматуростроение. – 2005. – № 5. – С. 48–51.
9. Гарганеев, А.Г. Электропривод запорной арматуры/ А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф. Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013 – 157 с.
10. Плахотникова, Е.В. Повышение эффективности систем «запорная арматура – электропривод»/ Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев// Известия Тульского государственного университета. Серия «Технические науки» – Тула: ТулГУ. – 2013. – Вып. 6. – Ч. 1. – С. 142–152.
11. Афонин, А.Н. Влияние податливости опор на напряженное состояние ходовых винтов / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.Н. Афонин // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Машиностроение. Приборостроение». – 2004. – № 4. – С. 104–107.
12. Плахотникова, Е.В. Повышение качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» путем обеспечения согласованности и функциональной совместимости их элементов / Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 1(303) – С. 37–44.

Плахотникова Елена Владимировна

Тульский государственный университет,
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Инструментальные и метрологические системы»
300012, Тула, пр. Ленина, 92
Тел.: 8 (4872) 332538
E-mail: e_plahotnikova@mail.ru

Протасьев Виктор Борисович

Тульский государственный университет, г. Тула
Доктор технических наук, профессор кафедры
«Инструментальные и метрологические системы»
300012, Тула, пр. Ленина, 92
Тел.: 8 (4872) 332538
E-mail: imstulgy@pochta.ru

E.V. PLAHOTNIKOVA, V.B. PROTASEV

LAW OF COMPATIBILITY AS BASE ELEMENT OF UPGRADING OF SYSTEMS «THE ELECTRIC DRIVE– STOP VALVES» ON WAY TOWARD IMPORT SUBSTITUTION

To the article the mathematical ground of laws of compatibility of electromechanic and plug-forming armature is driven within the framework of the single system. Educated, by the structural and functional design of dependence, allow to bring down the mismatch of the system «the electric drive – stop valves» taking into account structural descriptions of her elements, explaining to the tendency of upgrading of home products of the indicated type. Resulted by authors methodology and algorithms can be used for planning of the home systems of providing of safety of pipeline transport, including, : asynchronous electric motor, worm reducing gear and plug-forming armature with the rectilineal moving of plug-forming organ.

The approach presented in-process can be interesting for the wide sector of domestic industry, oriented to the production of competitive goods planning of that requires integration of different technical elements for realization of single objective function.

Keywords: *quality, competitiveness, import substitution, structural and functional description of the systems «the electric drive – stop valves».*

BIBLIOGRAPHY

1. K voprosu ob otvertochnoj sborke i lokalizacii proizvodstva. – URL: <http://www.sdelanounas.ru/blogs/8865>.
2. Baryshnikova, N. Uhod ot «otvertochnoj tehnologii» / N. Baryshnikova // Torgovo–promyshlennye vedomosti Jelektronnyj resurs. – URL: http://www.tpp-inform.ru/analytic_journal/4998.html.
3. Odess, V. Cennostnoj faktor – vazhnejshij jelement konkurentosposobnosti produkcii, realizuemoj na tovarnom rynke / V. Odess // RISK: Resursy, informacija, snabzhenie, konkurencija. – 2011. – № 2. – S. 184–185.
4. Falichev, O. Chernaja metka «otvertochnoj sborke» // Voенно–promyshlennyj kurer (VPK). – № 44(461).
5. Otvertochnaja sborka v Rossii – panaceja ili zabluzhdenie. – URL: <http://www.poletim.net/news/otvertochnaya-sborka-v-rossii-panaceya-ili-zabluzh>.
6. Stepanova, E.Ju. Naukoemkie otrasli i vysokie tehnologii – osnova tehnologicheskoi bezopasnosti i nezavisimosti strany / E.Ju. Stepanova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 2. – S. 122 – 132.
7. Stepanova, E.Ju. Jeksportnye ogranichenija USA i ES kak stimul k razvitiju naukoemkih i vysoko–tehnologichnyh sektorov jekonomiki / E.Ju. Stepanova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehniki. – 2014. – № 3. – S. 96 – 103.
8. Shpakov, O.N. O raschetah nagruzok v jelektroprivodnoj armature / O.N. Shpakov // Armaturostroenie. – 2005. – № 5. – S. 48–51.
9. Garganeev, A.G. Jelektroprivod zapornoj armatury/ A.G Garganeev, A.S. Karakulov, S.V Langraf. Monografija. – Tomsk: Izd–vo TPU, 2013 – 157 c.
10. Plahotnikova, E.V. Povyshenie jeffektivnosti sistem «zapornaja armatura – jelektroprivod»/ E.V. Plahotnikova, V.B. Protasev// Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Serija «Tehnicheskie nauki» – Tula: TulGU. – 2013. – Vyp. 6. –Ch 1. – S. 142–152.
11. Afonin, A.N. Vlijanie podatlivosti opor na naprjazhennoe sostojanie hodovyh vintov / Ju.S. Stepanov, A.V. Kirichek, A.N. Afonin // Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija «Mashinostroenie. Priborostroenie». – 2004. – № 4. – S. 104–107.
12. Plahotnikova, E.V. Povyshenie kachestva jelektrodinamicheskikh sistem «jelektroprivod – zapornaja armatura» putem obespechenija soglasovannosti i funkcionalnoj sovmestimosti ih jelementov / E.V. Plahotnikova, V.B. Protasev // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 1(303) – S. 37–44.

Plahotnikova Elena Vladimirovna

Tula State University, Tula

Ph.D., docent of Chair Tool and metrological systems

Ph.: 8 (4872) 332538

E–mail: e_plahotnikova@mail.ru

Protasev Viktor Borisovich

Tula State University, Tula

Ph.D., professor, professor of Chair Tool and metrological systems

Russia, Tula, Lenin Avenu,92

Ph.: 8 (4872) 332538

E–mail: imstulgy@pochta.ru

Е.О. АРИСКИН, О.И. КУЗНЕЦОВ, А.В. НИКИТИН, В.В. СОЛДАТКИН, В.М. СОЛДАТКИН

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ВЕТРА НА ВЕРТОЛЕТЕ НА ОСНОВЕ ИОННО–МЕТОЧНЫХ И АЭРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Рассматриваются важность задачи и особенности измерения скорости и угла направления вектора ветра относительно продольной оси вертолета на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах бортовыми средствами. Раскрываются принципы построения, алгоритмы обработки информации и достоинства бортовой системы измерения параметров вектора ветра на основе ионно–меточных и аэрометрических измерительных каналов.

Ключевые слова: вертолет, стоянка, стартовые и взлетно–посадочные режимы, авиационные происшествия, предотвращение, информация, скорость и угол направления вектора ветра, относительно продольной оси, измерение, бортовая система, ионно–меточные и аэрометрические измерительные каналы.

Непрерывное расширение круга решаемых задач и области применения гражданских и военных вертолетов обуславливает необходимость пополнения арсенала средств информационной поддержки экипажа на всех этапах и режимах эксплуатации.

Эксплуатация вертолетов происходит в приземном возмущенном слое атмосферы в условиях воздействия опасных внешних возмущений, влияющих на безопасность и эффективность выполнения полетных задач. При этом на стоянке до запуска силовой установки и при раскрутке несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности (стартовый режим), на этапах взлета, снижения, висения и посадки (взлетно–посадочные режимы) для предотвращения авиационных происшествий, связанных с опрокидыванием вертолета на бок или хвостовую балку, соударением лопастей несущего винта с землей, рулевым винтом и между собой [1] экипажу необходима достоверная информация о текущем значении скорости и угла направления вектора ветра относительно продольной оси вертолета при изменении его положения в азимуте в диапазоне $\pm 180^\circ$. Это определяет необходимость использования бортовых средств измерения параметров вектора ветра для обеспечения требований, регламентируемых Руководством по летной эксплуатации вертолета [2].

Известны средства измерения скорости и направления вектора ветра, реализующие флюгерно–тахометрический и аэрометрический методы, в которых в контролируемый воздушный поток вносятся установленный на фюзеляже винтокрылый ветроприемник [3], неподвижный или ориентируемый по потоку аэрометрический приемник [4]. По частоте вращения винтокрылого ветроприемника и угловому положению флюгера или по давлениям, воспринимаемым аэрометрическим приемником, определяется скорость и направление вектора ветра в месте расположения приемников.

Известна автоматическая метеостанция с неподвижным ветроприемным устройством, реализующая кинематический метод измерения [5]. Метеостанция представляет собой сферу в виде двух ортогональных трубчатых колец, на которых закреплены восемь ультразвуковых пьезокерамических преобразователей, образующих четыре пары излучателей и приемников ультразвуковых колебаний, которые располагаются в противоположных вершинах куба на одинаковом расстоянии друг от друга. По разности прохождения ультразвуковых акустических сигналов от излучателей до приемников в вычислительном устройстве определяется скорость и угол направления горизонтального вектора ветра, другие метеорологические параметры.

Однако при установке рассмотренных средств измерения параметров вектора ветра на фюзеляже вертолета на их работу оказывают существенное влияние индуктивные потоки вихревой колонны несущего винта, ограничивающие возможность измерения скорости и угла направления ветра на стоянке при вращении несущего винта, на стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета.

В работах [6, 7] раскрываются принципы построения и алгоритмы работы бортовой системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета, в которой для целей измерения используется информация результирующей

щего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемая неподвижным комбинированным аэрометрическим приемником [8].

Комбинированный аэрометрический приемник (рисунок 1) содержит неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник 1, выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3, между внутренними профилированными поверхностями которых в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений P_i , определяющих величину W и угол направления ψ вектора ветра \vec{W} в горизонтальной плоскости на стоянке до запуска силовой установки несущего винта.

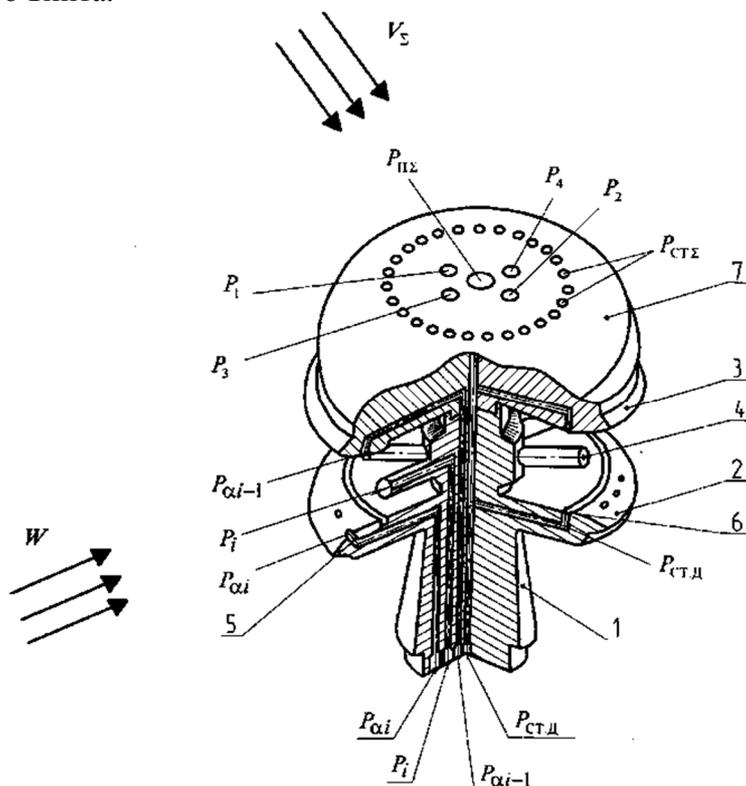


Рисунок 1 – Конструктивная схема неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления $P_{ст.д}$ при наличии ветра. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия 5 для забора давлений $P_{\alpha i}$ и $P_{\alpha i-1}$, определяющих угол ветра в вертикальной плоскости.

Таким образом, воспринимаемые неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником первичные информативные сигналы в виде давлений P_i , $P_{ст.д}$, $P_{\alpha i}$, $P_{\alpha i-1}$ позволяют определить величину W и угловое положение ψ вектора скорости ветра \vec{W} относительно продольной оси вертолета или продольную W_x и боковую W_z составляющие вектора ветра на стоянке до запуска силовой установки и раскрутки трансмиссии.

Для восприятия аэрометрической информации при запуске силовой установки и вращении несущего винта, на режиме руления и маневрирования вертолета по земле и на взлетно-посадочных режимах, когда неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник находится в створе вихревой колонны несущего винта, на наружной поверхности экранирующего диска 3 установлен дополнительный аэрометрический приемник 7 в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска. На поверхности полусферы на оси симметрии расположено отверстие, являющееся приемником полного давления $P_{ПЗ}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны. В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{01} к оси симметрии, симметрично расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_1 и P_2 . В плоскости, перпенди-

кулярной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{02} к оси симметрии, расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_3 и P_4 . Перпендикулярно оси симметрии сферического приемника на его поверхности, например по окружности, расположены отверстия, являющиеся приемниками статического давления $P_{ст\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны.

При рулении и маневрировании по земле и на взлетно–посадочных режимах, за меру величин составляющих вектора скорости ветра \overline{W} и вектора истинной воздушной скорости $\overline{V}_в$ вертолета принимается угловое положение вектора скорости \overline{V}_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, определяемое углами φ_1 и φ_2 , которые регистрируются ортогонально расположенными приемниками давлений P_1 и P_2 , P_3 и P_4 .

Давления P_1 и P_2 , P_3 и P_4 , $P_{п\Sigma}$ и $P_{ст\Sigma}$, воспринимаемые дополнительным аэрометрическим приемником 3, подключены ко входам пневмоэлектрических преобразователей, выходы которых через последовательно соединенные мультиплексор и аналого–цифровой преобразователь подключены к микропроцессору. На вход микропроцессора также подключены выходы приемника температуры торможения результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта и выходы пневмоэлектрических преобразователей давлений P_i , P_{ai} , P_{ai-1} , $P_{ст.д}$, воспринимаемых неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником 1. Выход микропроцессора является выходом бортовой системы по величине W и углу направления ψ или продольной W_x и боковой W_z составляющим вектора скорости ветра \overline{W} на стоянке, при рулении и маневрировании по земной поверхности, при взлете и посадке, в области малых и околонулевых скоростей полета и на режиме висения, когда неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник находится в зоне вихревой колонны несущего винта.

Однако использование бортовой системы измерения параметров вектора ветра на основе многоканального проточного аэрометрического приемника связано с необходимостью защиты трубок полного давления, установленных в его проточном канале от обледенения, попадания пыли и влаги в реальных условиях эксплуатации вертолета. Многоканальная схема преобразования воспринимаемых давлений обуславливает жесткие требования к идентичности и стабильности характеристик измерительных каналов системы. Все это усложняет конструкцию, снижает надежность, повышает стоимость и сдерживает применение бортовой системы измерения параметров вектора ветра на вертолетах.

Для устранения недостатков бортовой системы измерения параметров вектора ветра на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника для измерения скорости и угла направления ветра на стоянке до запуска силовой установки предлагается использовать неподвижный ионно–меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости.

На рисунке 2 приведена структурно–функциональная схема системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета, построенная на основе комбинации ионно–меточных и аэрометрических измерительных каналов.

Система измерения параметров вектора ветра на борту вертолета выполнена по двухканальной схеме и включает ионно–меточный канал измерения величины W и направления ψ вектора \overline{W} ветра на стоянке до запуска силовой установки.

В качестве ионно–меточного канала используется панорамный ионно–меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости [9], включающий плату 1 с системой приемных электродов 3, в центре 0 которой установлен искровой разрядник 2, подключенный к генератору меток (ГМ) 4. При подаче на высоковольтный разрядник 2 высоковольтного импульса от генератора меток (ГМ) 4 формируется ионная метка с явно выраженным электростатическим зарядом, которая движется совместно с воздушным потоком вектора ветра \overline{W} , приобретая его скорость W и направление ψ . При приближении заряженной ионной метки к приемным электродам 3, расположенным на окружности радиусом R , на них наводятся электростатические заряды, величина которых зависит от расстояния ионной метки до приемного электрода и углового положения ψ траектории движения метки.

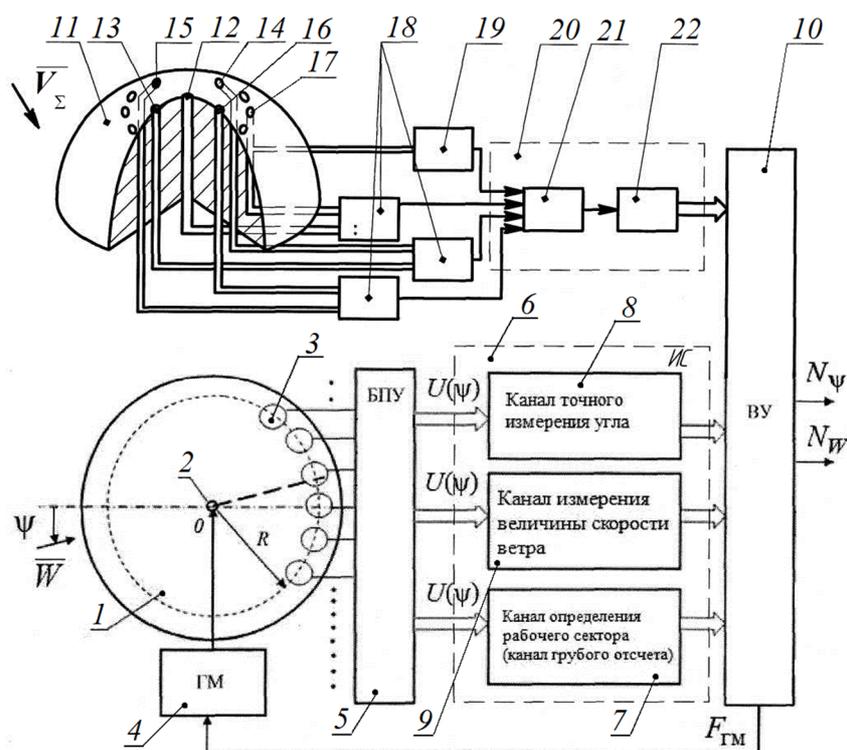


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема системы измерения параметров вектора ветра на основе ионно-точных и аэрометрических измерительных каналов

За счет выбора конструктивных параметров системы приемных электродов [4, 9] с помощью четных приемных электродов формируются положительные и отрицательные полуволны синусоидальных угловых характеристик информативных сигналов $U(\psi)$ на выходе четных предварительных усилителей. С помощью нечетных приемных электродов формируются положительные и отрицательные полуволны косинусоидальных угловых характеристик информативных сигналов $U(\psi)$ на выходе нечетных предварительных усилителей.

Выходные сигналы блока предварительных усилителей (БПУ) 5 подаются на входы измерительной схемы (ИС) 6, включающей канал 7 определения рабочего сектора (канал грубого отсчета) измеряемого угла ψ , канал 8 точного измерения угла в рабочем секторе и канал 9 измерения величины W скорости ветра. Выходные сигналы указанных каналов подаются на входы вычислительного устройства (ВУ) 10, которое по результатам обработки входной информации выдает цифровые коды N_ψ и N_W по углу ψ направления и скорости W ветра. Вычислительное устройство также формирует сигнал $F_{ГМ}$ запуска генератора ионных меток.

При попадании траектории ионной метки в i -ый грубый канал текущее значение измеряемого угла ψ определяется как:

$$\psi = i\alpha_0 + \alpha_p, \quad (1)$$

где α_0 – угол, охватывающий рабочий сектор грубого канала отсчета (при $i_{\max} = 4$, $\alpha_0 = 90^\circ$);

i – номер рабочего сектора ($i = \overline{1,4}$);

α_p – значение измеряемого угла в пределах i -го рабочего сектора.

Сигналы, пропорциональные синусу $A \sin \alpha_i$ и косинусу $A \cos \alpha_i$ измеряемого угла в i -ом рабочем секторе грубого канала и снимаемые с блока предварительных усилителей, обрабатываются в вычислительном устройстве, на выходе которого выдается цифровой код, связанный со значением α_p измеряемого угла в пределах рабочего сектора точного канала соотношением:

$$\alpha_p = \arctg \frac{A \sin \alpha_i}{A \cos \alpha_i}, \quad (2)$$

где α_i – текущее значение измеряемого угла в пределах i -го рабочего сектора.

При работе канала измерения величины (модуля) скорости вектора ветра \overline{W} формируется интервал времени τ_W пролета ионной метки расстояния R от точки генерации θ ионной

метки до окружности с приемными электродами. В соответствии с интервалом времени τ_W в вычислительном устройстве вырабатывается цифровой код N_W , пропорциональный величине скорости ветра:

$$W = \frac{R}{\tau_W}. \quad (3)$$

В меточном датчике аэродинамического угла и воздушной скорости реализуется кинематический метод измерения величины (модуля) и угла направления вектора ветра, при котором точность измерения угла направления ψ и скорости W ветра не зависит от состояния окружающей среды (температуры, атмосферного давления, плотности, влажности и т.п.).

Выполнение системы приемных электродов в виде расположенных по окружности металлических пластин позволяет сформировать логотметрические информативные сигналы с синусоидальной и косинусоидальной угловыми характеристиками и обеспечить измерение угла направления вектора ветра во всем диапазоне его измерения, т.е. от 0 до 360° или $\pm 180^\circ$ без увеличения габаритных размеров системы приемных электродов. При этом конструктивное выполнение приемных электродов совместно с предварительными усилителями канала регистрации в виде автономных модулей, позволяет существенно повысить помехоустойчивость канала регистрации ионных меток и увеличить разрешающую способность по измеряемому углу и скорости ветра при малых габаритах системы приемных электродов.

Выполнение измерительной схемы формирования выходных сигналов в виде канала определения рабочего сектора измеряемого угла, являющегося каналом грубого отсчета, и канала точного измерения угла в каждом из рабочих секторов, подключенных к вычислительному устройству, позволяет существенно повысить разрешающую способность по измеряемому углу направления вектора ветра во всем диапазоне его изменения без увеличения числа приемных электродов и габаритных размеров системы приемных электродов.

Предложенное выполнение каналов определения рабочего сектора измеряемого угла и канала точного измерения угла внутри каждого рабочего сектора обеспечивает надежное определение рабочего сектора и точное измерение текущего значения угла внутри каждого рабочего сектора, что также позволяет повысить точность измерения в широком диапазоне изменения направления вектора скорости ветра при одновременном изменении величины скорости ветра.

На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности, на взлетно–посадочных режимах в работу включается второй – аэрометрический канал, выполненный на основе неподвижного полусферического аэрометрического приемника 11, жестко установленного над платой 1 приемных электродов ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.

На рисунке 3 показана конструктивная схема датчика воздушных сигналов системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета на основе ионно–меточных и аэрометрических измерительных каналов.

Перпендикулярно системе приемных электродов 1 панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости на стойках 3 установлен неподвижный полусферический аэрометрический приемник 2, на поверхности которого расположены отверстия для восприятия давлений, несущих информацию о векторе скорости \overline{V}_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта (рисунок 1).

Воспринимаемые давления по пневмоканалам через стойки 3 передаются ко входам пневмоэлектрических преобразователей, расположенных внутри панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости. Для восприятия информации результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта на поверхности полусферического аэрометрического приемника 11 (рисунок 2) расположены отверстия 12 для забора полного давления $P_{\Pi\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, отверстия 13, 14 и 15, 16 для забора давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 , определяющих углы ϕ_1 и ϕ_2 положения вектора скорости \overline{V}_Σ относительно оси симметрии полусферического приемника в плоскости параллельной продольной оси вертолета и в плоскости перпендикулярной продольной оси вертолета, а также отверстия 17 для забора статического давления $P_{СТ\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта.

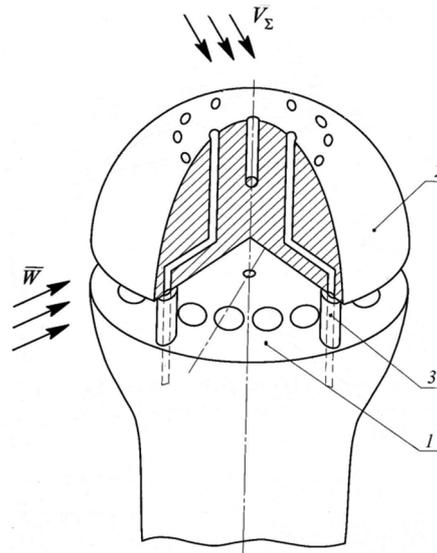


Рисунок 3 – Конструктивная схема датчика воздушных сигналов системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета на основе ионно-меточных и аэрометрических измерительных каналов

Воспринимаемые давления $P_{ПΣ}$, P_1 , P_2 и P_3 , P_4 , $P_{СТΣ}$ с помощью пневмоэлектрических преобразователей перепада давлений 18 и преобразователя абсолютного давления 19 преобразуются в электрические сигналы, которые через канал 20 аналого-цифрового преобразования, включающего мультиплексор 21 и АЦП 22 подаются в вычислительное устройство 10, на выходе которого формируются цифровые сигналы по скорости W и углу направления ψ вектора ветра.

На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта вектор скорости $\vec{V}_Σ$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта можно представить в виде геометрической суммы вектора скорости ветра \vec{W} и стационарной составляющей \vec{V}_{i0} вектора скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом, т.е.:

$$\vec{V}_Σ = \vec{W} + \vec{V}_{i0}; \quad \vec{W} = \vec{V}_Σ - \vec{V}_{i0}. \quad (4)$$

Для конкретного типа вертолета и места установки неподвижного пространственно распределенного датчика воздушных сигналов с аэрометрическими и ионно-меточными измерительными каналами на фюзеляже вертолета составляющие V_{ix} , V_{iy} , V_{iz} вектора \vec{V}_{i0} скорости индуктивного потока вихревой колонны несущего винта в связанной системе координат можно описать уравнениями вида [10]:

$$V_{ix} = K_{ix} V_{i0}; \quad V_{iy} = K_{iy} V_{i0}; \quad V_{iz} = K_{iz} V_{i0}, \quad (5)$$

где $V_{i0} = \sqrt{\frac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}$ – модуль вектора \vec{V}_{i0} скорости индуктивного потока несущего винта на режиме висения;

K_{ix} , K_{iy} , K_{iz} – безразмерные коэффициенты, функционально связанные с параметрами режима полета и определяемые при летных испытаниях данного типа вертолета для конкретного места установки датчика воздушных сигналов;

G – вес вертолета;

$$n_y \text{ – нормальная перегрузка } \left(n_y = \frac{1}{g} \frac{d^2 H}{dt^2} - 1 \right);$$

ρ_H – плотность воздуха на данной высоте H ;

F – площадь, ометаемая несущим винтом вертолета;

χ – коэффициент заполнения диска несущего винта;

$g = 9,80665$ – ускорение свободного падения.

Величину (модуль) вектора скорости \bar{V}_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта можно определить по полному $P_{\Pi\Sigma}$ и статическому $P_{\text{СТ}\Sigma}$ давлениям и температуре $T_{\text{Т}\Sigma}$ торможения результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемой приемником температуры торможения, установленного на фюзеляже в зоне действия вихревой колонны несущего винта, используя соотношение [10]:

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{\text{Т}\Sigma} \left[\left(\frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}}{P_{\text{СТ}\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left(\frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}}{P_{\text{СТ}\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143}}}, \quad (6)$$

где параметры, входящие в формулу (6) имеют размерности в единицах системы СИ.

Проекции вектора \bar{V}_Σ скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего на оси связанной системы координат определяются как

$$V_{\Sigma x} = V_\Sigma \cdot \sin\varphi_1; \quad V_{\Sigma y} = V_\Sigma \cdot \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2; \quad V_{\Sigma z} = V_\Sigma \cdot \sin\varphi_2. \quad (7)$$

где φ_1 и φ_2 – углы, определяющие положение вектора скорости \bar{V}_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего относительно осей полусферического аэрометрического приемника, которые определяются по давлениям P_1, P_2 и P_3, P_4 .

Используя соотношения для определения давления на поверхности полусферического аэрометрического приемника, приведенные в работе [11], углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора скорости \bar{V}_Σ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, будут определяться соотношениями:

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}}\right); \quad \varphi_2 = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}}\right), \quad (8)$$

где φ_{10} и φ_{20} – углы расположения отверстий для забора давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 .

Тогда в соответствии с выражениями (5) – (8) продольная W_x , боковая W_z составляющие и модуль (величина) W_Γ горизонтального ветра \bar{W} на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта будут определяться как:

$$W_x = V_\Sigma \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}} - K_{ix} V_{i0}; \quad W_z = V_\Sigma \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}} - K_{iz} V_{i0}; \quad (9)$$

$$W_\Gamma = \sqrt{W_x^2 + W_z^2}; \quad \psi = \arctg \frac{W_z}{W_x},$$

Таким образом, по давлениям P_1, P_2 и $P_3, P_4, P_{\Pi\Sigma}$ и $P_{\text{СТ}\Sigma}$, воспринимаемым на поверхности осесимметричного, например полусферического аэрометрического приемника, и температуре $T_{\text{Т}\Sigma}$ торможения результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего, используя соотношения (9) можно определить параметры вектора скорости ветра \bar{W} на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта.

На режиме руления и маневрирования вертолета по земной поверхности в качестве исходного уравнения для определения параметров вектора скорости ветра вместо выражения (4) необходимо использовать соотношение

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{W} + \bar{V}_{i0} + \bar{V}_p, \quad (10)$$

где \bar{V}_p – вектор скорости руления и маневрирования вертолета по земной поверхности, продольную V_{px} и боковую V_{pz} составляющие которого можно определить, используя информацию от спутниковой навигационной системы, установленной на вертолете.

Тогда, используя соотношения (5) – (10), выражения для определения продольной W_x и боковой W_z составляющих и величины (модуль) W_Γ горизонтального ветра \bar{W}_Γ при рулении

и маневрировании по земной поверхности будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 W_x &= V_\Sigma \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Gamma}} - K_{ix} V_{i0} - V_{px}; \\
 W_z &= V_\Sigma \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Gamma}} - K_{iz} V_{i0} - V_{pz}; \\
 W_\Gamma &= \sqrt{W_x^2 + W_z^2}; \quad \psi = \arctg \frac{W_z}{W_x}.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

где θ_D – угол наклона диска несущего винта.

На взлетно–посадочных режимах вертолета в качестве исходного уравнения для определения параметров вектора скорости ветра вместо выражения (4) необходимо использовать соотношения вида

$$\bar{V}_\Sigma = -\bar{V}_B + \bar{V}_{ic}; \quad \bar{V}_B = \bar{W} + \bar{V}_\Pi.
 \tag{12}$$

где \bar{V}_B – вектор истинной воздушной скорости вертолета ($\bar{V}_B = -\bar{V}$);

\bar{V}_Π – вектор путевой скорости вертолета, параметры которого определяются доплеровским измерителем скорости и угла сноса (ДИСС);

\bar{V} – вектор скорости воздушного потока, набегающего на неподвижный полусферический аэрометрический приемник.

Поскольку неподвижный панорамный ионно–меточный датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником, расположенном на фюзеляже на определенном радиус–векторе \bar{R} от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости \bar{V} воздушного потока, набегающего на аэрометрический приемник, которое определяется векторным уравнением вида:

$$\bar{V}_k = \bar{V} + \bar{\omega} \times \bar{R}(x, y, z),
 \tag{13}$$

где \bar{V}_k – кинематически искаженный вектор скорости набегающего воздушного потока в месте установки неподвижного комбинированного аэрометрического приемника;

$\bar{\omega} (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости вращения вертолета относительно центра масс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат;

x, y, z – координаты места установки неподвижного панорамного меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Проекции вектора скорости \bar{V}_k на оси связанной системы координат будут определяться системой уравнений вида:

$$\begin{aligned}
 V_{kx} &= V_x + (\omega_y z - \omega_x y); \\
 V_{ky} &= V_y + (\omega_z x - \omega_x z); \\
 V_{kz} &= V_z + (\omega_x y - \omega_y x),
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где V_x, V_y, V_z – проекции вектора истинной воздушной скорости V_B на оси связанной системы координат.

Продольная и боковая составляющие V_x, V_z и величина (модуль) V_B вектора истинной воздушной скорости \bar{V}_B , углы атаки α и скольжения β вертолета, статическое давление P_H и барометрическая высота H будут определяться соотношениями:

$$\begin{aligned}
 V_x &= V_\Sigma \sin \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}} \right) \right] \times \\
 &\times \cos \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}} \right) \right] - K_{ix} V_{i0} - (\omega_y z - \omega_x y); \\
 V_z &= V_\Sigma \sin \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}} \right) \right] - K_{iz} V_{i0} - (\omega_x y - \omega_y x);
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$V_B = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin \frac{V_z}{V_B};$$

$$P_H = P_{\text{СТ}\Sigma} - K_p \frac{\rho_\Sigma V_\Sigma^2}{2}; \quad \rho_\Sigma = \frac{P_{\text{СТ}\Sigma}}{287,05287 T_{\text{Т}\Sigma}} \left(\frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{СТ}\Sigma}}{P_{\text{СТ}\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143};$$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right],$$

где $P_0=101325$ Па и $T_0=288,15$ К – абсолютное давление и абсолютная температура воздуха на высоте $H=0$ стандартной атмосферы;

R – удельная газовая постоянная воздуха ($R = 287,05287$ Дж/кг·К);

τ – температурный градиент ($\tau = 0,0065$ К/м);

K_p – безразмерный коэффициент, определяющий связь $P_{\text{СТ}\Sigma}$ и P_H , который определяется при летных испытаниях для конкретного типа вертолета и места установки на фюзеляже неподвижного панорамного меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным на нем осесимметричным полусферическим аэрометрическим приемником;

K_{iy} – безразмерный коэффициент, определяемый аналогично K_{ix} и K_{iz} .

Используя информацию о величине V_Π и угле сноса ψ_c вектора путевой скорости \bar{V}_Π от доплеровского измерителя скорости и угла сноса и составляющих вектора истинной воздушной скорости \bar{V}_B , продольная W_x , боковая W_z составляющие, величина (модуль) W и направление ψ горизонтального вектора ветра \bar{W} на взлетно–посадочных режимах вертолета определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}
 W_x &= |V_x| - V_\Pi \cos \psi_c; & W_z &= |V_z| - V_\Pi \sin \psi_c; \\
 \psi &= \beta + \psi_c; & W_\Gamma &= \sqrt{W_x^2 + W_z^2}.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Таким образом, используя информацию, воспринимаемую неподвижным датчиком воздушных сигналов, выполненным в виде неподвижного панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником, в вычислительном устройстве, выполненном в виде вычислителя, реализующего алгоритмы (1) – (3), (6), (9), (11), (16), определяются параметры вектора скорости ветра на стоянке до запуска силовой установки, на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности, при взлете, снижении, висении и посадке вертолета. Построенная на основе ионно–меточных и аэрометрических измерительных каналов бортовая система измерения параметров вектора ветра обладает расширенными функциональными возможностями и областью применения.

Применение бортовой системы измерения параметров вектора ветра на вертолетах различного класса и назначения позволяет повысить безопасность их эксплуатации на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах, что имеет существенное значение для гражданской и военной авиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерусалимский, М.А. Экипажам вертолетов – информационную поддержку / М.А. Ерусалимский, В.Н. Егоров // Авиасоюз. – 2011. – № 2. – С. 24–26.

2. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8 (издание 4-ое). – М: Авторитет, 1996. – 554 с.
3. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П. Африногенова и Е.В. Романова. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 296 с.
4. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
5. Азбукин, А.А. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, А.А. Кобзов // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 42–52.
6. Никитин, А.В. Система измерения параметров вектора ветра на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета / А.В. Никитин, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 6. – С. 64–70.
7. Никитин, А.В. Бортовая система измерения параметров вектора ветра на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета / А.В. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3. – С. 117–125.
8. Солдаткин, В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта: Монография. / В.В. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 284 с.
9. Ганеев, Ф.А. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интегрированной схемой обработки / Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 46–50.
10. 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.
11. Петунин, А.Н. Методы и техника измерения параметров газового потока (Приемники давления и скоростного напора) / А.Н. Петунин. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.

Арискин Евгений Олегович

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ)

Магистрант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

Тел. 8–960–042–52–57

E-mail: nikitin.rf@mail.ru

Кузнецов Олег Игоревич

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ)

Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

Тел. 8–987–290–81–48

E-mail: nikitin.rf@mail.ru

Никитин Александр Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ)

Ассистент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

Тел. 8–987–220–50–20

E-mail: nikitin.rf@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

Тел. 8–987–290–81–48

E-mail: nikitin.rf@mail.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ)

Доктор технических наук, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

Тел. 8–917–289–06–75

E-mail: nikitin.rf@mail.ru

E.O. ARISKIN, O.I. KUZNETSOV, A.V. NIKITIN, V.V. SOLDATKIN, V.M. SOLDATKIN

SYSTEM FOR MEASURING PARAMETERS OF THE WIND VECTOR HELICOPTER ON THE BASED ION-MAKING AND AEROMETRIC MEASUREMENT CHANNELS

The importance of the task and features of measuring the velocity and direction angle of the wind vector relative to the longitudinal axis of the helicopter in the parking lot, starting and take-off and landing modes onboard means are considered. Principles of construction, algorithms of information processing and advantages of on-board system for measurement of parameters of the wind vector on the based of ion-making and aerometric measurement channels.

Keywords: helicopter, parking, starting and take-off and landing modes, accident, prevention, information, velocity and direction angle of the wind vector, relative to the longitudinal axis, the measurement, on-board system, ion-making and aerometric measurement channels.

BIBLIOGRAPHY

1. Yerusalimskiy, M.A. Ekipazham vertoletov – informatsionnyuyu podderzhku / M.A. Yerusalimskiy, V.N. Yegorov // Aviasoyuz. – 2011. – № 2. – S. 24–26.
2. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii vertoleta Mi-8 (izdaniye 4-oye). – M: Avtoritet, 1996. – 554 s.
3. Pribory i ustanovki dlya meteorologicheskikh izmereniy na aerodromakh / Pod red. L.P. Afrinogenova i Ye.V. Romanova. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 296 s.
4. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatelnykh apparatov. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2001. – 448 s.
5. Azbukin, A.A. Avtomaticheskiye meteostantsii AMK-03 i ikh modifikatsii / A.A. Azbukin, A.Ya. Bogushevich, A.A. Kobzov // Datchiki i sistemy. – 2012. – № 3. – S. 42–52.
6. Nikitin, A.V. Sistema izmereniya parametrov vektora vetra na startovykh i vzletno-posadochnykh rezhimakh vertoleta / A.V. Nikitin, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2013. – № 6. – S. 64–70.
7. Nikitin, A.V. Bortovaya sistema izmereniya parametrov vektora vetra na startovykh i vzletno-posadochnykh rezhimakh vertoleta / A.V. Nikitin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 3. – S. 117–125.
8. Soldatkin, V.V. Sistema vozdushnykh signalov vertoleta na osnove nepodvizhnogo aerometricheskogo priyemnika i informatsii aerodinamicheskogo polya vikhrevoi kolonny nesushchego vinta: Monografiya. / V.V. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2012. – 284 s.
9. Ganeyev, F.A. Ionno-metochnyy datchik aerodinamicheskogo ugla i vozdushnoy skorosti s logometricheskimi informativnymi signalami i integrirovannoy skhemoy obrabotki / F.A. Ganeyev, V.M. Soldatkin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2010. – № 3. – S. 46–50.
10. Kozitsin, V.K. Algoritmicheskoye obespecheniye sistemy vozdushnykh signalov vertoleta na osnove svobodno oriyentirovannogo priyemnika davleniy / V.K. Kozitsin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2006. – № 4. – S. 52–57.
11. Petunin, A.N. Metody i tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka (Priyemniki davleniya i skorostnogo napora) / A.N. Petunin. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 332 s.

Ariskin Evgeniy Olegovich

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Master of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: 8–960–042–52–57
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Kuznetsov Oleg Igorevich

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Poststudent of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: 8–987–290–81–48
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Nikitin Aleksandr Vladimirovich

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Assistant of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: 8–987–220–50–20
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Soldatkin Vladimir Mihailovich

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Ph.D., professor, head of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: +79872908148
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Soldatkin Viacheslav Vladimirovich

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Ph.D., docent of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: +79172890675
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

М.И. АБАШИН, А.А. БАРЗОВ, А.Л. ГАЛИНОВСКИЙ, В.А. МОИСЕЕВ

ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНО–ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

В статье предложена модель технико–экономической оптимизации контрольно–диагностических операций. Дана классификация и показана информативность физических тестовых воздействий, функционально–подобных эксплуатационным нагрузкам. Приведены примеры синтеза физически инновативных контрольно–диагностических операций и намечены перспективы развития результатов исследований. В данной работе основное внимание уделяется двум взаимосвязанным аспектам комплексной проблемы повышения качества контрольно–диагностических операций: развитию формализованных подходов к построению модели оптимизации их структуры; анализу и синтезу функционально–инновативных тестовых физических воздействий, как одного из ключевых элементов получения контрольно–диагностической информации об исследуемом объекте, исходя из принципа подобия этого воздействия условиям его эксплуатации.

Представленный материал является предварительным обобщением части исследований проводимых на Физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова и факультете «Специальное машиностроение» МГТУ имени Н.Э. Баумана по проблеме обеспечения технико–экономического качества физико–технологических инноваций применительно к ключевым этапам жизненного цикла изделий ответственного назначения.

***Ключевые слова:** физико–технологическая инновация, контроль, диагностика, испытание, жизненный цикл.*

Под физико–технологической инновацией (ФТИ) будем понимать новое физически обусловленное конструкторско–технологическое решение и/или ранее не известное нестандартное сочетание традиционных технологических элементов реализующих более высокие характеристики функционального качества объекта анализа и/или более значительный уровень его потребительских свойств, т.е. требуемую рынком кинетическую конкурентоспособность изделия.

Важнейшим резервом обеспечения качества изделия на эксплуатационно–технологических этапах его жизненного цикла является разработка и практическое применение ФТИ, связанных с совершенствованием контрольно–диагностических и испытательных (КДИ) операций. Именно опережающее развитие ФТИ данного профиля способно существенным образом повысить технический уровень изделий, в первую очередь ответственного назначения в ведущих отраслях промышленности. Это положение объясняется тем, что взаимосвязанная и весьма развитая система КДИ операций являются по–существу функционально–результативным физико–технологическим фильтром качества специальных объектов и изделий на ключевых этапах их жизненного цикла.

В связи с вышеизложенным проблема анализа и оптимизации структуры и содержания КДИ операций по технико–экономическим критериям весьма актуальна в ведущих отраслях промышленного производства. Решение этой важнейшей задачи повышения эффективности КДИ операций должно основываться на построении соответствующих математических моделей оценки их технико–экономического качества и, в случае необходимости, синтеза новых контрольно–диагностических и испытательных технологий, являющихся результатом фундаментальных исследований и прикладного использования перспективных ФТИ.

Ключевой проблемой обеспечения качества производственного этапа жизненного цикла (ЖЦ) любого изделия ответственного назначения является экономически обоснованный выбор метода или рациональной комбинации способов контроля, диагностики и/или испытаний, функционально входящих в маршрутно–операционную структуру технологии их изготовления [1]. Поэтому построение модели анализа и оптимизации данной структуры по технико–экономическим критериям представляется весьма значимым элементом в построении общего подхода к созданию эффективной системы управления качеством различных объектов производства на всех этапах их ЖЦ [2]. Схематично исследуемая альтернатива в оптимизации структуры КДИ операций сводится к следующему положению. При обязательном условии обеспечения требуемого техническим заданием уровня надежности производ-

ственного этапа ЖЦ изделия обосновать с экономических позиций наиболее приемлемый вариант применения одной, как правило, дорогостоящей высоко технически результативной КДИ операции, обоснованной на соответствующем физическом процессе и/или явлении, или нескольких операций, имеющих более низкую разрешающую способность, но соответственно, существенно меньшую технологическую себестоимость [3]. Для наглядности в графическом виде эта альтернатива, как два варианта структурной схемы надежности, представлена на рисунке 1.

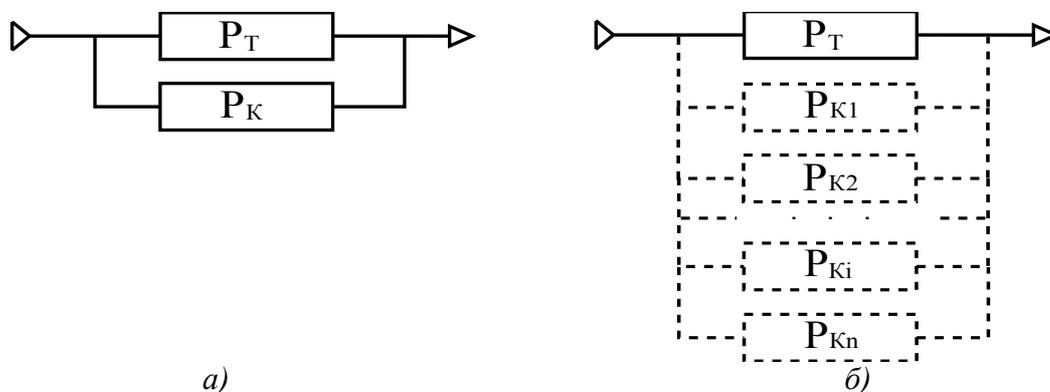


Рисунок 1 – Иллюстрация технико-экономической альтернативы построения рациональной КДИ операции, как фильтра качества объекта анализа

а – применение одной высокоэффективной, но дорогостоящей КДИ операции;
 б – использование нескольких КДИ операций меньшей разрешающей способности, но имеющих более низкие стоимостные параметры, чем P_k

На данном рисунке представлены также основные принятые обозначения:

P_T – вероятность выполнения части технологического маршрута или технологической операции без брака (вероятность безотказности технологического элемента);

P_k – вероятность обнаружения брака на КДИ операции (разрешающая способность фильтра качества);

P_i – разрешающая способность i -й КДИ операции;

$i = 1, 2, \dots, n$ – общее число КДИ операций по обеспечению требуемого техническим заданием уровня надежности технологии P_{T3} .

Исходя из известных правил определения безотказности функционирования элементов, объединенных структурной схемой, имеющей вид представленный на рисунке 1, б можно записать:

$$P_{T3} = 1 - (1 - P_T) \prod_{i=1}^n (1 - P_{ki}) \quad (1)$$

Зависимость (1) связывает в единый вероятностный комплекс требуемую техническим заданием вероятность безотказного выполнения анализируемого производственного блока изготовления изделия P_{T3} с вероятностью качественного выполнения технологических P_T и КДИ операций – P_{ki} , где $i = 1, 2, \dots, n$ – их общее количество. Именно определение n – числа КДИ операций, функциональные возможности которых соответственно определяются P_{ki} , по критерию минимума себестоимости единой контрольно-технологической структуры типа представленной на рисунке 1, б является задачей её анализа и оптимизации по технико-экономическим параметрам [4].

Сделаем два замечания:

1. В общем случае P_T в зависимости (1) может быть вероятностным итогом выполнения не одной, а нескольких технологических операций, и иных элементов технологического маршрута и т.п. функционально-структурных блоков, вплоть до целых этапов ЖЦ изделия. Это обстоятельство конкретизируется в постановке задачи анализа и технико-экономической оптимизации.

2. Фактически выражения в скобках в соотношении (1) представляют собой вероятности отказов: $q = (1 - P)$ соответствующих элементов структурной схемы надежности, типовой вариант которой представлен на рисунке 1, б.

Основное функционально–вероятностное соотношение (1) для технико–экономической конкретизации необходимо дополнить стоимостным выражением вида:

$$C = C_T + \sum_{i=1}^n C_{ki} \quad (2)$$

где C – общая себестоимость контрольно–технологической структуры, описываемой соотношением (1) и представленной на рисунке 1, б;

C_T – технологическая себестоимость операции (операций) по изготовлению, формированию облика изделия, конструкции и/или иного объекта анализа (ОА);

C_{ki} – технологическая себестоимость i –ой КДИ операции, причем: $i=1,2,\dots,n$ – их общее число.

Очевидно, что формально решение поставленной оптимизационной задачи определяется из решения следующего уравнения:

$$\frac{\partial C}{\partial i} = 0 \rightarrow n_{opt}; \quad \left(\frac{\partial^2 C}{\partial i^2} > 0 \right) \quad (3)$$

где C – целевая (оптимизационная) функция;

i – оптимизационно–варируемый параметр;

n_{opt} – экономически оптимальное количество КДИ операций.

Для численного решения (3) которое позволит обеспечить экономически рациональное проектирование и реализацию производственно–технического этапа ЖЦ различных ОА ответственного назначения, необходимо определение физически обусловленных функциональных взаимосвязей между разрешающей способностью (эффективностью) конкретной КДИ операцией и её технологической себестоимостью:

$$C_{ki} = f(P_{ki}) \quad \text{или} \quad P_{ki} = F(C_{ki}) \quad (4)$$

где C_{ki} технологическая себестоимость i –ой КДИ операции, имеющей вероятность безотказного функционирования P_{ki} .

Именно функциональная детализация массива соотношений типа физико–технологических возможностей конкретных КДИ операций, основанная на анализе (4) представляет собой научно–практическое ядро рассматриваемой оптимизационно–экономической задачи [5]. Причем дополнив её постановку формально–аналогичными соотношениями вида:

$$C_{Tm} = f(P_{Tm}) \quad \text{или} \quad P_{Tm} = F(C_{Tm}) \quad (5)$$

можно сформулировать обобщенную модель анализа и оптимизации не только совокупности КДИ операций, но и основных операционных технологий. Эти технологические операции ($m = 1,2,\dots,l$ – общее число рассматриваемых вариантов) характеризуются индивидуально–парными значениями их себестоимости C_{Tm} и вероятности безотказного функционирования (P_{Tm}).

Таким образом, основной перспективой развития предлагаемого подхода к анализу и оптимизации системы обеспечения качества различных ОА, в первую очередь ответственного назначения, можно считать проблему совокупного исследования физико–технологических возможностей основных операций изготовления изделия и соответствующих им рациональных КДИ операций. В такой постановке данная проблема проектирования оптимальной структуры управления качеством продукции на всех этапах ЖЦ является весьма важным научно–прикладным элементом промышленной экономики в целом [6].

С феноменологических позиций проанализируем возможность функциональной конкретизации массива соотношений типа (4), представляющих собой зависимости разрешающей способности КДИ операций от технологической себестоимости их реализации.

Подчеркнем, что именно формирование соответствующей базы данных по массиву функций вида (4) представляет собой весьма емкую научно–прикладную проблему экономи-

ческой диагностики. Решение этой задачи позволяет целенаправленно подойти к созданию высокоэффективных систем автоматизированного проектирования КДИ операций (САПР), как ключевого элемента обобщенной структуры CALS-технологий. Данное обстоятельство особенно важно при создании новых изделий ответственного назначения в условиях определенного кадрового дефицита компетентных специалистов соответствующего профиля на предприятиях ведущих отраслей промышленности, в том числе оборонного назначения.

Исходя из физико-технологической логики рассматриваемой задачи можно вполне обоснованно предположить, что вид функциональной зависимости между разрешающими возможностями конкретной КДИ операции и её технологической себестоимостью будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

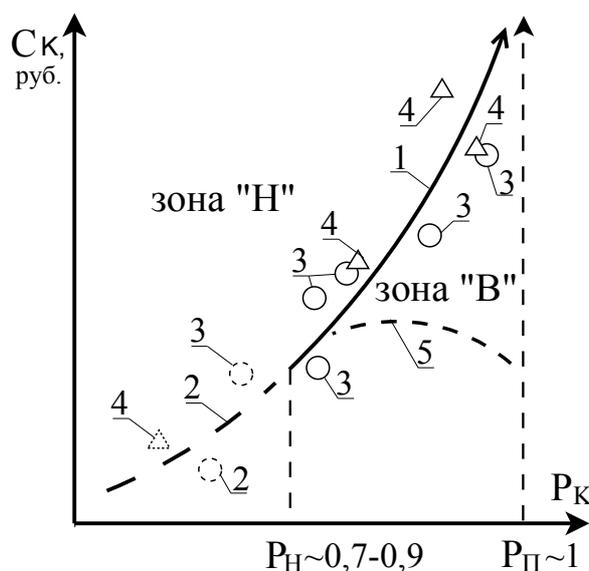


Рисунок 2 – Графическая иллюстрация функциональной зависимости КДИ операции и её технологической себестоимостью:

1 – Функционально-асимптотическая зависимость $C_k = f(P_k)$ в области практически значимых уровней $P_n \leq P_k \leq P_n \sim 1,0$; (зона «В» – высоких значений где P_n – начальный уровень значимого разрешения КДИ операции; $P_n \sim 1,0$ – предельный уровень разрешения этой операции); 2 – Зависимость $C_k = f(P_k)$ в области не-высоких значений разрешения КДИ операций (зона «Н» – низкого уровня P_k); 3 – Техничко-экономическая характеристика конкретной КДИ операции, полученная на основе статистических данных, расчетно-аналитическим путем и т.д.; 4 – Экспертная оценка технико-экономической эффективности анализируемой КДИ операции; 5 – Иллюстрация смены контрольно-диагностической и/или испытательной парадигмы физико-технологического обеспечения качества.

Прокомментируем некоторые практически значимые позиции рисунка 2, представляющие определенный научный интерес.

1. Реальный производственный интерес представляет собой зависимость 1 на участке $P_n \leq P_k \leq P_n \sim 1,0$, так как при $P_k < P_n$ организационные затраты на осуществление низкоэффективных КДИ операций не соответствуют их ожидаемой функциональной результативности. Однако зависимость 2 может быть весьма полезна при формировании обобщенных функций вида (4) для осуществления процедуры технико-экономической оптимизации по модели (3).

2. Необходимо учитывать, что позиции (3) и (4) на рисунке 2 фактически означают различные КДИ операции, основанные на своих индивидуально-физических процессах и/или явлениях, обеспечивающих получение необходимой информации о параметрах состояния объекта анализа, в частности рассматриваемой технологической операции. В принципе эти позиции могут означать существенную модернизацию известной КДИ операции с целью повышения её функциональных возможностей при разумном росте технологической себестоимости.

3. В случае, если за счет использования информационно-диагностических возможностей новых физических процессов и/или явлений характер зависимости (1) не является асимптотическим, что основанная на них КДИ операция должна быть безальтернативно

включена в маршрут изготовления изделия. Действительно, если при росте P_k имеет место постоянство или даже снижение C_k , то задача технико–экономической оптимизации сводится только к рациональному анализу эффекта от использования данной информационно–физической инновации. В методологическом отношении отмеченное обстоятельство означает смену контрольно–диагностической и/или испытательной парадигмы, как функционально–производственного фильтра технологического качества ОА и представляет наибольший научно–практический интерес. Схематично это отображено пунктирной линией (5) на рисунке 2, иллюстрирующей технико–экономический результат от использования новых физических принципов построения КИД операций.

В качестве характерных примеров математической формализации функции: $C_k = f(P_k)$ приведем следующие выражения, удовлетворяющие феноменологическим требованиям к виду типовой зависимости C_k от P_k . Помимо традиционной полиномиальной аппроксимации позиций 3,4 на рисунке 2 заслуживает внимания экспоненциальная зависимость вида:

$$C_k = C_o \left[\exp \alpha \left(\frac{P_k}{1 - P_k} \right) - 1 \right], \quad (6)$$

где C_k – технологическая себестоимость КДИ операции при P_k уровне её надежности;
 C_o – масштабирующий стоимостной коэффициент рассматриваемой зависимости C_k (P_k), имеющий размерность (руб);

α – коэффициент, ответственный за интенсивность изменения функции $C_k(P_k)$.

Кроме (6) можно воспользоваться более простым, но менее гибким соотношением вида:

$$C_k = C_o \frac{P_k}{1 - P_k}, \quad (7)$$

Тогда функционально–достаточный массив выражений типа (6) или (7), а также аналогичных соотношений замыкают модель оптимизации (3), которая позволяет определить количество КДИ операций по критерию минимума технологической себестоимости структурного контрольно–технологического операционного элемента, представленного на рис. 1б.

Для наглядного представления алгоритма оптимизации согласно модели (3), рассмотрим условный пример определения экономически рационального числа КДИ операций. Допустим, что в области предположительно–оптимального значения n_{opt} функции вида (6) или (7) можно заменить линейной зависимостью:

$$C_k = C_o (1 + \alpha P_k) \quad (8)$$

Кроме того, для определенности, положим также, что функциональные параметры проектируемых КДИ операций равны между собой:

$$P_{ki} \sim const \text{ при } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Тогда после очевидных преобразований, получим следующие исходные соотношения между анализируемыми параметрами контрольно–технологического операционного элемента, представленного на рисунке 1, б:

$$P_k = 1 - i \sqrt{\frac{1 - P_{T3}}{1 - P_T}} \quad (10)$$

$$C = C_T + i C_o (1 + \alpha P_k) \quad (11)$$

Для численного решения (3) с учетом (10) и (11) предположим, что $P_T = 0,5$, т.е. надежность технологической операции крайне не высока; $P_{T3} = 0,995$, что соответствует среднему уровню итоговой надежности; $\alpha \sim 2$, т.е. имеет место умеренный рост C_k в области n_{opt} . Тогда опуская промежуточные вычисления получим, что экономически оптимальное число КДИ операций при данном низком уровне надежности основной операционной технологии составит:

$$i \sim 3 \rightarrow n_{opt} \quad (12)$$

При этом требуемый уровень надежности КДИ операции должен быть согласно (10) не ниже $P_k \geq 0,7$, что вполне соответствует техническим возможностям современных информационно–физических методов оценки параметров состояния ОА [7].

Таким образом, в вышерассмотренном условном примере показана возможность достижения требуемого уровня надежности отдельного контрольно–технологического элемента общего маршрута изготовления изделия путем реализации трехкратного анализа его качества и парирования последствий появления возможного брака в ходе выполнения рассматриваемой технологической операции. При этом именно это количество КДИ операций обеспечит минимальную себестоимость данного контрольно–технологического элемента в общей структуре производства конкретного изделия [8]. Функционально–аналогичная ситуация может иметь место при обеспечении требуемой эксплуатационной надежности изделий ответственного назначения. В частности хорошо известны случаи многократного дублирования различных контрольно–диагностических сенсоров параметров состояния ОА в конструкциях авиационной и ракетно–космической техники, например датчиков давления в двигателях ракетносителей тяжелого класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мымоин, Ю.Н. Выбор и оптимизация технико–экономических показателей машин при разработке технического задания / Ю.Н. Мымоин, И.Н. Малахов. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
2. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев. – Тамбов: Изд–во Тамбовского гос. технического ун–та, 2013. – Ч. 3. – 116 с.
3. Шишмарёв, В.Ю. Диагностика и надежность автоматизированных систем / В.Ю. Шишмарёв. – М.: Академия, 2013. – 351 с.
4. Цыплин, Б.В. Оптимизация поиска неисправностей при технической диагностике оборудования: Учеб. пособие / Б.В. Цыплин. – Пенза: Изд–во Пенз. гос. ун–та, 2002. – 108 с.
5. Мартиросов, Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей физических процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения / Д.С. Мартиросов. – М. Изд–во МАИ, 1998. – 53 с.
6. Шептунов, С.А. Жизненный цикл продукции / С.А. Шептунов. – М.: Янус–К, 2003. – 244 с.
7. Меньшиков, В.А. Методы мониторинга надежности ракетно–космических систем / В.А. Меньшиков, Б.И. Сухорученков. – М.: НИИ КС, 2006. – 474 с.
8. Dubov, A. The metod of metal magnetic memory – the new trend in engineering diagnostics.–Welding in the World. – 2005. – Т. 49. – № 9. – p.p. 314–319.

Галиновский Андрей Леонидович

МГТУ им. Н. Э. Баумана
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +7(916)1580064
E–mail: galcomputer@yandex.ru

Барзов Александр Александрович

МГТУ им. Н. Э. Баумана
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +7(925)1552527
E–mail: a.a.barzov@gmail.com

Моисеев Валерий Александрович

МГТУ им. Н. Э. Баумана
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +7(925)1552527
E–mail: moiseev56@mail.ru

Абашин Михаил Иванович

МГТУ им. Н. Э. Баумана
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +7(916)1580064
E–mail: texhelp@list.ru

M.I. ABASHIN, A.A. BARZOV, A.L. GALINOVSKIY, V.A. MOISEYEV

FEASIBILITY STUDY PERFORMANCE THE MONITORING OPERATIONS

In this paper we propose a model of technical and economic optimization of control and diagnostic operations. The classification of informative and shows the physical ones-ists impacts func-

tionally similar operational loads. Examples of synthesis physically innovative control and diagnostic operations and outlines the prospects for the development of research results. In this paper focuses on two related aspects of the complex problem of improving the quality of con-controlling diagnostic operations: development of formal approaches to the construction of model optimize their structure; analysis and synthesis of functional and innovative test of physical impacts, as a key element of obtaining control and diagnostic information about the object, based on the principle of similarity of the effects of the conditions of its operation.

The material presented is preliminary generalization of the research-tions conducted at the Faculty of Physics, Moscow State University University and faculty "Special machinery» NE Bauman Bauman on the problem of feasibility quality physical and technological innovation in the key stages of the life cycle of products for critical applications.

Keywords: *physical and technological innovation, control, diagnostics, probationer, test, life cycle.*

BIBLIOGRAPHY

1. Mymoin, Yu.N. Vybor i optimizatsiya tekhniko–ekonomicheskikh pokazateley mashin pri razrabotke tekhnicheskogo zadaniya / Yu.N. Mymoin, I.N. Malakhov. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 152 s.
2. Divin, A.G. Metody i sredstva izmereniy, ispytaniy i kontrolya: uchebnoye posobiye / A.G. Divin, S.V. Ponomarev. – Tambov: Izd–vo Tambovskogo gos. tekhnicheskogo un–ta, 2013. – Ch. 3. – 116 s.
3. Shishmarov, V.Yu. Diagnostika i nadezhnost avtomatizirovannykh sistem / V.Yu. Shishmarov. – M.: Akademiya, 2013. – 351 s.
4. Tsyplin, B.V. Optimizatsiya poiska neispravnostey pri tekhnicheskoy diagnostike oborudovaniya: Ucheb. posobiye / B.V. Tsyplin. – Penza: Izd–vo Penz. gos. un–ta, 2002. – 108 s.
5. Martirosov, D.S. Diagnostirovaniye slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove matmaticheskikh modeley fizicheskikh protsessov i izmeryayemykh parametrov metodom strukturnogo isklyucheniya / D.S. Martirosov. – M. Izd–vo MAI, 1998. – 53 s.
6. Sheptunov, S.A. Zhiznennyy tsikl produktsii / S.A. Sheptunov. – M.: Yanus–K, 2003. – 244 s.
7. Menshikov, V.A. Metody monitoringa nadezhnosti raketno–kosmicheskikh sistem / V.A. Menshikov, B.I. Sukhoruchenkov. – M.: NII KS, 2006. – 474 s.
8. Dubov, A. The metod of metal magnetic memory – the new trend in engineering diagnostics.–Welding in the World. – 2005. – T. 49. – № 9. – p.p. 314–319.

Galinovsky Andrey Leonidovich

MGTU N.E. Baumana
Ph.D., Professor of the Department «Technology space–rocket engineering»
Ph.: +7 (916) 1580064
E–mail: galcomputer@yandex.ru

Moiseyev Valeriy Aleksandrovich

MGTU N.E. Baumana
Ph.D., Associate Professor of the Department «Technology space–rocket engineering»
Ph.: +7 (925) 1552527
E–mail: moiseev56@mail.ru

Barzov Aleksandr Aleksandrovich

MGTU N.E. Baumana
Ph.D., Professor of the Department «Technology space–rocket engineering»
Ph.: +7 (925) 1552527
E–mail: a.a.barzov@gmail.com

Abashin Mikhail Ivanovich

MGTU N.E. Baumana
Ph.D., Associate Professor of the Department «Technology space–rocket engineering»
Ph.: +7 (916) 1580064
E–mail: texhelp@list.ru

О.С. МИХАЙЛОВА, Н.М. БУЛАЕВА, Е.А. МУСИХИНА

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕГИОНАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматривается возможность разработки, на основе системного подхода, региональной автоматизированной экспертной системы, позволяющей произвести адекватную оценку риска антропогенного воздействия на природную среду. Определены и обоснованы пошаговые задачи построения универсальной модели экспертной системы, позволяющей оценивать риски антропогенного воздействия в количественном выражении. В целях обеспечения оптимизации системы управления, обоснованного распределения сил и средств в области охраны и укрепления здоровья, наряду с выявлением ведущих факторов, оказывающих воздействие на состояние здоровья населения, основным показателем эффективности превентивных мер является положительная динамика, регистрируемая экоинформационной системой мониторинга.

Ключевые слова: экоинформационная система мониторинга, оценка риска, антропогенное воздействие на природную среду, модель подсчета эколого–экономического ущерба.

Актуальной задачей, как в теоретическом, так и в практическом плане являются разработка и внедрение экоинформационной системы мониторинга (ЭИСМ), с использование инновационных методов и технологий, позволяющих качественно и количественно оценивать риски антропогенного воздействия на природную среду регионов.

Методологической базой проектирования ЭИСМ является системный подход, в соответствии с которым любая система представляет собой совокупность взаимосвязанных объектов (элементов), функционирующих совместно для достижения общей цели.

С кибернетических позиций процесс управления системой можно представить в виде информационного процесса, связывающего внешнюю среду, объект и систему управления. При этом внешняя среда и объект управления информируют систему управления о своем состоянии, система управления анализирует эту информацию, вырабатывает управляющее воздействие на объект управления, отвечает на возмущения внешней среды и при необходимости модифицирует цель и структуру всей системы.

Построение любой модели экосистемы начинается, как правило, с организации оперативного и непротиворечивого доступа к массивам первичных данных экспедиционных исследований, каковой и является эколого–информационная система мониторинга (ЭИСМ), определяемая как региональная автоматизированная экспертная система по экологии и природоохранной деятельности, включающая всю располагаемую совокупность данных мониторинга и состоящая из следующих компонентов [1–2]:

- системы управления базами данных (СУБД), обеспечивающей хранение и оперативную выборку необходимой информации;
- геоинформационной системы (ГИС), преобразующей информацию о территории в виде набора предметных слоев на электронной карте местности и осуществляющей пространственную экстраполяцию расчетных показателей;
- пакета прикладных программ (ППП), включающего библиотеку математических методов, синтезирующих набор решающих правил (коллектив предикторов) для оценки качества экосистемы и анализа причинно–следственных связей этой оценки с факторами среды.

База знаний содержит в себе знания о предметной области. Для представления знаний, используется та или иная модель знаний, зависящая от особенностей решаемой задачи. Создание, ведение и применение базы знаний обеспечивает инструментальная система управления базой знаний (СУБЗ).

Целью данного исследования является проектирование основных элементов экоинформационной системы мониторинга региона (ЭИСМ).

Разработка и применение программных продуктов «Расчет интерференции плотности антропогенного воздействия на почвенный покров Иркутской области», «Расчет антропогенного воздействия на водные ресурсы по ртути и хлору», как и заключительная программа «Визуализация комплексного антропогенного воздействия на воздушную сре-

ду территории Иркутской области» базируются на стандартных отчетах о состоянии атмосферного воздуха на территории РФ, и представляют данные о загрязнении в максимально удобном виде, включающем наряду с таблицами деловую графику [3–5]. Программа ориентирована на использование административным аппаратом управления с целью поддержки принятия решений по экологическому развитию области.

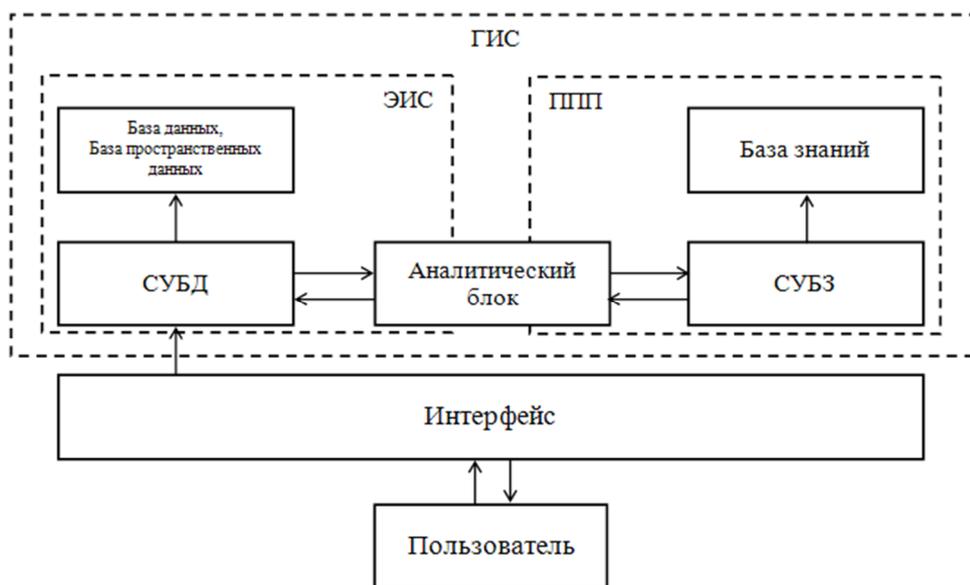


Рисунок 1– Схема системы поддержки принятия решения (СППР) на основе ЭИСМ

Для реализации целей исследования реализовано решение следующих задач.

Задача 1. Анализ структуры данных мониторинга загрязнения природных сред и выбор приоритетных показателей загрязнения с целью комплексной оценки атмосферного воздуха урбанизированных территориях Иркутской области.

Подробно структура документопотока между предприятием – природопользователем и государственными органами рассмотрена в [6]. При долгосрочном планировании экономического развития городов Иркутской области необходимо обладать четкой и агрегированной информацией по уровням загрязнения атмосферного воздуха, а так же оперативно определять районы с наиболее напряженной экологической обстановкой.

Известен ряд подходов по определению уровня загрязнения атмосферы [7,8]. Основными проблемами, при определении уровня загрязнения являются: выяснение показателей, определяющих состояние атмосферного воздуха, и определение уровня загрязнения атмосферы. Проведенный анализ литературных источников позволяет определить ряд требований к показателям загрязнения атмосферы. Такой показатель должен быть приемлем для целей прогнозирования. Если например, показатель загрязнения будет отмечать более загрязненным состояние атмосферы с меньшими концентрациями или наоборот, то прогнозирование с таким показателем будет осуществляться с низкой достоверностью. При принятии решений целесообразно, чтобы показатель загрязнения и уровни также устанавливались пропорционально загрязнению атмосферы.

Анализ данных мониторинга показал, что в качестве приоритетных для сравнительной оценки состояния загрязнения воздушной среды на урбанизированных территориях могут быть использованы следующие параметры:

- предельно допустимые концентрации (ПДК);
- класс опасности загрязняющего вещества;
- радиус удаленности от территории.

Задача 2. Определение показателя для комплексной оценки состояния атмосферного воздуха на урбанизированных территориях Иркутской области.

Для вычисления величины параметра за основу принята «модель подсчета эколого-экономического ущерба, наносимого окружающей среде (ОС) горным производством» [9,10]. В рамках этой модели предлагалось для комплексной оценки состояния почв террито-

рии Иркутской области использовать следующую формальную пространственно–временную модель, в которой левая часть формулы представляет собой пространственные отношения, правая характеризует временную компоненту:

$$Y = \frac{C_{\text{нар}} * S_{\text{нар}}}{100 * S_{\text{общ}}^n} * K_{\text{св}} * T_{\text{max}} * \left(\frac{1}{Ck}\right)^{n-1},$$

где Ck – масштабный коэффициент подобия;
 T_{max} – время жизни компонента природной среды;
 n – количество уровней системы, для которых производится расчет;
 $K_{\text{св}}$ – коэффициент связи компонентов природной среды;
 $C_{\text{нар}}$ – степень нарушенности земель;
 $S_{\text{нар}}$ – площадь загрязненных токсикантами земель;
 $S_{\text{общ}}$ – общая площадь территории Иркутской области [4].

В алгоритме расчета применена формула, полученная путем адаптации на воздушную среду модели подсчета эколого–экономического ущерба, наносимого ОС горным производством. Исходя из свойства природных систем, развивающихся в режиме самоорганизации и характеризующихся затуханием степени локального воздействия при распространении его на постепенно увеличивающийся размер окружающего пространства, с учетом ПДК и класс опасности загрязняющих веществ, формула расчета качественного показателя состояния воздушной среды представляется следующим выражением:

$$Y = \frac{\sum_i^1 N_{i(\text{зв})} * K_{i(\text{ко})} + \sum_j^1 M_{j(\text{озв})} * K_{j(\text{кот})}}{r_{\text{усл}} + \sum_k^1 L_{k(\text{вр})}},$$

где $K_{i(\text{ко})}$ – коэффициенты, учитывающие класс опасности загрязняющего вещества и принимаются для I класса опасности – 16,3; для II – 7,43; для III – 3,43; для IV – 1,58;

$N_{i(\text{зв})}$ – среднегодовая концентрация загрязняющих веществ, относительно уровня ПДК, измеряемая в количестве раз;

$K_{j(\text{кот})}$ – коэффициенты, учитывающие класс опасности загрязняющего вещества измеренного в тысячах тонн, для основных загрязняющих веществ, каких как твердые, диоксид серы (SO_2), диоксид азота (NO_2), окись углерода (CO);

$M_{j(\text{озв})}$ – масса основных загрязняющих веществ, измеряемая в тысячах тонн.

$r_{\text{усл}}$ – условный радиус населенного пункта, рассчитывается по формуле $r = \sqrt{S/\pi}$, где S – площадь населенного пункта;

$L_{k(\text{вр})}$ – период дискретизации, принимаемый равным 5 км, исходя из эмпирических данных [11].

Полученная модель не охватывает временной фактор воздействия поллютантов и визуализирует характеристику состояния приземного слоя атмосферного воздуха только на текущий момент времени.

Используя характеристику качественного показателя состояния воздушной среды, выделены города высокой напряженности экологической обстановки (высокие уровни загрязнения воздушной среды в результате антропогенной нагрузки), города ранжированы с применением ранговой шкалы на единой методической основе.

Задача 3. Разработка базы данных показателей загрязнения атмосферного воздуха и программного обеспечения для расчета показателя комплексной оценки и визуализации полученных результатов.

База данных является основным элементом программы «Визуализация комплексного антропогенного воздействия на воздушную среду территории Иркутской области». Она позволяет накапливать и систематизировать данные о состоянии загрязнения воздушной среды в городах Иркутской области.

Логическая структура внутримашинной информационной базы обусловлена логической структурой источников данных и спецификой расчета показателя комплексной оценки.

База данных реализована в приложении MSExcel, несмотря на то, что для работы с базами данных есть другие специализированные приложения, например, MSAccess, принято решение в пользу Excel. Данное приложение целесообразно использовать в тех случаях, когда нужно оперировать с небольшими объемами данных.

Данные структурированы на рабочих листах с названиями годов, так же есть листы для расчетов дополнительных параметров (рисунок 2).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data table:

| Характеристика антропогенного воздействия | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|---------------|--|
| Вещества, для которых qср>1 ПДК | | | | | | | | | | |
| Класс опасности | | | | 3,43 | 1,58 | 7,43 | 3,43 | 16,13 | 7,43 | |
| | | | | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | |
| Города | Уровень опасности | Вещества, для которых СИ>10 | НП, % и вещество | SO2 диоксид серы | CO оксид углерода | NO2 диоксид азота | NO оксид азота | БП бенз(а)пирен | Ф формалдегид | |
| Иркутск | ОВ | БП | | | 1,1 | 1,6 | 1,3 | 4,4 | 4,7 | |
| Ангарск | П | | | | | | | 1 | 1 | |
| Байкальск | Н | | | | | | | 1 | | |
| Братск | ОВ | Ф, CS2 | 20,3NO2, 54,1CS2 | | | 2,8 | 1,1 | 4 | 9 | |
| Зима | ОВ | | 26,8NO2 | | | 2,6 | | 4,2 | 3,3 | |
| Саянск | В | | | | | | | 2,1 | 2,3 | |
| Свирск | Н | | | | | 1 | | | | |
| Слюдянка | Н | | | | | | | | | |
| Тулун | Н | | | | | 1 | | | | |
| Усолье-Сибирское | В | | | | | 1,3 | | 3,2 | | |
| Усть-Илимск | П | | | | | 1 | | 1 | | |
| Черемхово | ОВ | | | | | 1,8 | | 5,1 | | |
| Шелехов | В | | | | 1,03 | | | 3,1 | 2,7 | |

Рисунок 2 – Структурные элементы БД

Таблица содержит 13 записей, соответствующих 13 городам Иркутской области (Иркутск, Ангарск, Байкальск, Братск, Зима, Саянск, Свирск, Слюдянка, Тулун, Усолье-Сибирское, Усть-Илимск, Черемхово, Шелехов), и 21 поле содержащих информацию о качественных и количественных показателях загрязнения воздушной среды, а так же справочные данные, не участвующих в расчетах, но позволяющих «на глаз» определить ситуацию в интересующем городе за определенный период.

Для реализации проекта выбран язык Visual Basic for Applications (VBA) [12], поскольку база данных для расчетов была создана в программе MS Excel в виде таблиц, включающих в себя информацию об абсолютных и качественных показателях загрязнения воздушной среды полученных из официальных источников. VBA позволяет реализовать в программе следующие функции:

- Провести статический анализ уровней загрязнения по 13 городам Иркутской области: Иркутск, Ангарск, Байкальск, Братск, Зима, Саянск, Свирск, Слюдянка, Тулун, Усолье-Сибирское, Усть-Илимск, Черемхово и Шелехов.

- Получить визуальный автоматизированный отчет по каждому интересующему пользователя показателю;

- Спрогнозировать состояние воздушной среды, интересующего пользователя города, на последующий двухгодичный временной интервал.

В результате проделанной работы, для расчета показателя комплексной оценки, разработаны база данных мониторинга загрязнения воздушной среды и косвенных статических показателей антропогенной нагрузки по городам Иркутской области и программное обеспечение для расчетов, визуализации и анализа полученных результатов.

Задача 4. Проведение комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха на урбанизированных территориях Иркутской области с использованием разработанного программного обеспечения.

Программа выполняет визуализацию распространения и интенсивности антропогенного воздействия на воздушную среду территорий по каждому из 13 городов с 2006 по 2011 годы (рисунок 3). Представленная гистограмма позволяет определить степень загрязнения атмосферной среды городов Иркутской области, с учетом не только абсолютных показателей суммарных выбросов вредных веществ в атмосферу, но и других факторов, влияющих на общее состояние воздушной среды.

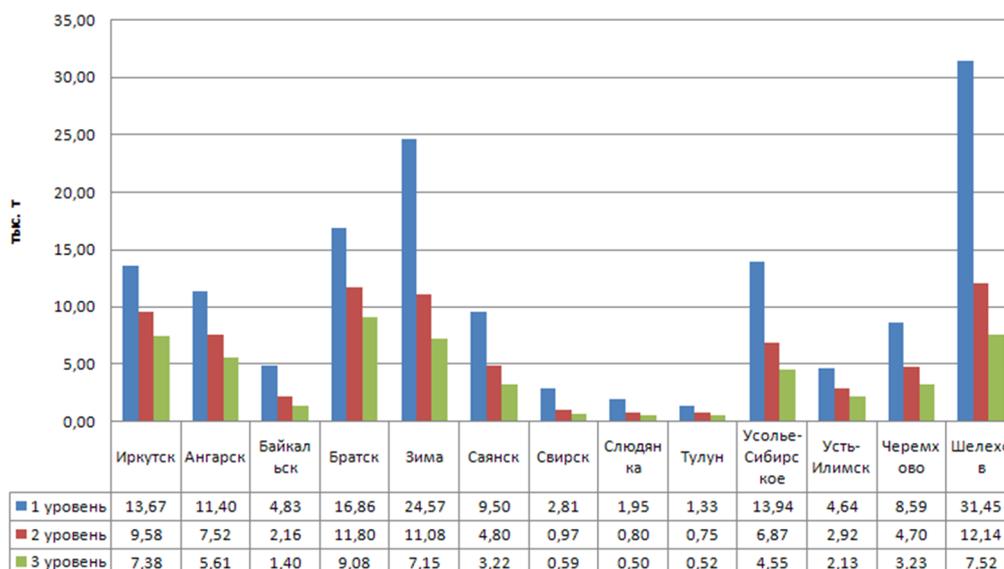


Рисунок 3 – Гистограмма, отображающая динамику качественного показателя состояния воздушной среды по уровням степени локального воздействия, 2011 г.

Максимальное значение качественного показателя в 2011 году прослеживается в городе Шелехове. Данный показатель резко убывает на втором и на третьем уровне, данная ситуация характерна для небольшого по площади города, каковым и является г. Шелехов (площадь – 31 км²) с очень значительными показателями выбросов в атмосферу. Следовательно, всю территорию г. Шелехова можно рассматривать как локальный объект, характеризующийся самым высоким уровнем антропогенного воздействия. Города Зима, Братск, Усолье-Сибирское, Иркутск и Ангарск также характеризуются высоким качественным показателем степени антропогенного воздействия на атмосферный воздух.

Сравнение результатов расчета по данным Иркутского УГМС и косвенным параметрам антропогенной нагрузки показало, что данные мониторинга являются объективными для оценки напряженности экологической ситуации в городах Иркутской области.

Задача 5. Оценка влияния загрязнения окружающей среды на состояние здоровья населения урбанизированных территорий Иркутской области.

В последние годы значительно возросла антропогенная нагрузка на окружающую среду, современный человек живет в условиях динамичной, постоянно меняющейся окружающей среды. Динамика изменения окружающей среды имеет в основном отрицательный характер. Ухудшение качества среды обитания человека приводит к снижению эффективности работы адаптационных механизмов защиты.

Загрязнение может оказывать различное воздействие на организм. Реакция организма определяется индивидуальными особенностями, возрастом, полом, состоянием здоровья человека. Более уязвимы дети, больные, лица, работающие во вредных производственных условиях, курильщики.

По оценкам экспертов Всемирной организации здравоохранения различают 5 категорий реакций состояния здоровья населения на загрязнение окружающей среды:

- повышение смертности;
- повышение заболеваемости;
- наличие функциональных изменений, превышающих норму;
- наличие функциональных изменений, не превышающих норму;
- относительно безопасное состояние.

Данные категории можно рассматривать, как относительные показатели, совокупно характеризующие состояние здоровья человека и качество окружающей среды. Показателем здоровья в первую очередь является количество здоровья, т.е. средняя ожидаемая продолжительность жизни.

Наибольшее влияние на здоровье человека оказывает загрязнение атмосферного воздуха. Основными загрязнителями атмосферного воздуха в Иркутской области являются: энергетика (51,9%), обрабатывающие производства (30,9%), добыча полезных ископаемых и автотранспорт (7,9%) [13].

Иркутская область занимает 3-е место в Сибирском Федеральном округе по объему выбросов стационарными источниками загрязняющих веществ (1-е место – Красноярский край, 2-е место – Кемеровская область). Среди городов области по объему валовых выбросов на 1-м месте находится Ангарск, далее следуют: Братск, Иркутск, Усть-Илимск, Шелехов, Саянск, Усолье–Сибирское, Усть-Кут и т.д. [14].

Основными твердыми загрязняющими веществами являются золы углей и дров, сажа, пыль неорганическая и древесная, пыль удобрений (аммофоса и аммиачной селитры) и др. Основными газообразными и жидкими поллютантами – сернистый ангидрид, оксид углерода, оксиды азота, углеводороды и другие летучие органические соединения [13].

В атмосферу поступают такие специфические загрязнители, как: бензин, ксилол, толуол, масло минеральное, этилацетат, уксусная кислота, диэтиловый эфир, формальдегид, бенз(а)пирен, стирол, водород хлористый, марганец и его соединения, кислота серная, фенол, метилмеркаптан, хлор, спирт изопропиловый, азотная кислота, дихлорэтан, хром трехвалентный, оксиды меди, никель, водород цианистый, свинец, сероводород, циклогексанон, акрилонитрил, сероуглерод, озон и другие вещества, многие из которых относятся к опасным и высокоопасным.

Многие перечисленные вещества представляют значительную опасность в отношении здоровья человека, так как обладают общетоксическим, аллергенным и канцерогенным действием.

Кроме того, проблема загрязнения воздуха атмосферными поллютантами усугубляется ростом доли выбросов от автотранспорта, что обусловлено значительным увеличением регионального автопарка [13].

Отрицательно на экологической ситуации сказывается не только быстрый рост автопарка, но и тот факт, что в Иркутской области, как и в России в целом, велика доля автотранспорта, эксплуатирующегося более 10 лет.

Заболевания населения, прямо или косвенно обусловленные экологическими факторами, и связанные с ними дополнительные случаи смертности значительно усугубляют демографическую ситуацию в области.

Здоровье населения Иркутской области в настоящее время оценивается как неудовлетворительное, вследствие высокой смертности и инвалидности, постоянно растущей общей и первичной заболеваемости, низкой ожидаемой продолжительности жизни.

В Иркутской области в течение 2007–2011 гг. улучшились демографические показатели: вырос общий показатель рождаемости с 13,8 до 15,3‰; снизились показатели смертности – общей с 14,4 до 14,0‰ и младенческой с 11,0 до 8,9‰ на 1 тыс. чел., естественная убыль сменилась естественным приростом – с –0,2 до +1,3 на 1 тыс. чел. Ожидаемая продолжительность жизни при рождении увеличилась с 64,74 года до 65,9 лет (у мужчин – с 58,49 до 59,6 лет; у женщин – с 71,26 до 72,5 лет).

Однако увеличились показатели общей и первичной заболеваемости населения на 18,0 и 11,5%, соответственно, рост показателей заболеваемости наблюдается по всем возрастным группам [13].

Для получения детальной информации взаимосвязи качества окружающей среды и медико-демографических показателей здоровья населения, необходимо дальнейшее изучение выявленной проблемы с учетом региональных особенностей и синергизма загрязнения в целом. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения представляет собой сложное явление и рассматривается как результат воздействия многих факторов, оказывающих влияние на жизнь отдельных людей и населения в целом. Для обеспечения оптимизации системы управления, обоснованного распределения сил и средств в области охраны и укрепления здоровья населения важно выявлять ведущие факторы, воздействующие на состояние здоровья, и на основе определенных степеней их влияния разрабатывать и применять ком-

плекс превентивных мер, что не представляется возможным без внедрения экоинформационной системы мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булаева, Н.М. Системный подход к организации сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов Дагестана / Н.М.Булаева, В.И. Гридин, М.Г. Даниялов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 2. – С. 30 – 41.
2. Булаева Н.М., Османов Р.Ш. Система ведения актуальной базы данных мониторинга / Н.М. Булаева, Р.Ш. Османов // МОНИТОРИНГ. Наука и Технологии . – 2010. – № 4. – С.34–44.
3. Расчет интерференции плотности антропогенного воздействия на почвенный покров Иркутской области / Л.Ю. Дмитриева, Е.А. Мусихина // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009616716 от 03 декабря 2009 г. РОСПАТЕНТ.
4. Расчет антропогенного воздействия на водные ресурсы по ртути и хлору / Е.А. Мусихина // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010615261 от 13 августа 2010 г. РОСПАТЕНТ.
5. Визуализация комплексного антропогенного воздействия на воздушную среду территории Иркутской области / Е.А. Мусихина, Л.Ю. Дмитриева, О.С. Михайлова // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014611218 от 28 января 2014 г. РОСПАТЕНТ.
6. Разработка технологической схемы системы государственного экологического мониторинга / Е.А. Мусихина, О.С. Михайлова // Современные наукоёмкие технологии. – М: Академия Естествознания. – 2012. – С. 63–65.
7. Жаворонков, Ю. М. Национальная система управления чистотой воздушного бассейна США: обзорная информация / Ю. М. Жаворонков. – ВНИИГМИ–МЦД, Обнинск, 1980. – 50 с.
8. Пинигин, М.А. Роль оценки опасности загрязнения в охране атмосферного воздуха городов / М.А. Пинигин //Сб. тр. Ин-та общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Сысина. – 1976. – Вып. 3. – С. 14–19.
9. Мусихина, Е.А. Исследование влияния фактора времени на оценку состояния окружающей среды в условиях работы горнодобывающих предприятий / Е.А. Мусихина. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 90 с.
10. Мусихина, Е.А. Методологический аспект технологии комплексной оценки экологической емкости территорий / Е.А. Мусихина. – М.: Издательство «Академия Естествознания», 2009. – 137 с.
11. Михайлова, О.С. Программа «визуализация комплексного антропогенного воздействия на воздушную среду территории Иркутской области» / О.С. Михайлова, Л.Ю. Дмитриева, Е.А. Мусихина // Информационные системы и технологии. – М.: Госуниверситет – УНПК. – 2014. – С. 31–38.
12. Бурман, В.М. Автоматизированная распределенная система экологического мониторинга окружающей среды модульного типа / В.М. Бурман, Ю.А. Кропотов // Информационные системы и технологии. – 2008. – № 1–2. – С. 53–57.
13. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2007 – 2011 г.г.: гос. докл. Иркутск: Форвард.
14. Информационно-аналитический бюллетень «Оценка влияния факторов среды обитания на здоровье населения Иркутской области в 2012 году» // управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по иркутской области, 2013. – 27 с.

Михайлова Ольга Сергеевна
Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск
Аспирант,
Тел.: 75–304, 8–950–100–46–75
E-mail: mikhaylova.istu@gmail.com

Булаева Нуржаган Маисовна
ООО «Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов»
г. Махачкала.
Доктор технических наук, профессор, директор ООО «Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов»,
Тел.: 8–8722–94–00–97
E-mail: monitoringst@mail.ru

Мусихина Елена Алексеевна
Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск
Кандидат технических наук, профессор,
Тел.: 8–950–05–07–424
E-mail: elena.science@yandex.ru

O.S. MIKHAILOVA, N.M. BULAEVA, E.A. MUSIKHINA

DEVELOPMENT OF REGIONAL MODELS AUTOMATED EXPERT SYSTEM

The article discusses the possibility of developing, on the basis of a systematic approach, regional automated expert system that allows making an adequate assessment of the risk of human impact on the environment. Identified and justified step by step the problem of constructing a universal model of an expert system that allows assessing the risks of human impact in quantitative terms. In order to optimize the control system, sound distribution of power and resources

in the field of health protection and promotion, together with the identification of the main factors that affect the health of the population, the main indicator of the effectiveness of preventive measures is a positive trend, recorded eko information monitoring system.

Keywords: *eco information system monitoring, risk assessment, human impact on the natural environment, the model calculation of ecological and economic damage.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bulayeva, N.M. Sistemnyy podkhod k organizatsii sopryazhennogo monitoringa okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Dagestana / N.M. Bulayeva, V.I. Gridin, M.G. Daniyalov // *Monitoring. Nauka i tekhnologii.* – 2010. – № 2. – S. 30 – 41.
2. Bulayeva N.M., Osmanov R.SH. Sistema vedeniya aktualnoy bazy dannykh monitoringa / N.M. Bulayeva, R.Sh. Osmanov // *MONITORING. Nauka i Tekhnologii.* – 2010. – № 4. – S.34–44.
3. Raschet interferentsii plotnosti antropogennogo vozdeystviya na pochvennyy pokrov Irkutskoy oblasti / L.Yu. Dmitriyeva, Ye.A. Musikhina // *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2009616716 ot 03 dekabrya 2009 g. ROSPATENT.*
4. Raschet antropogennogo vozdeystviya na vodnyye resursy po rtuti i khloru / Ye.A. Musikhina // *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2010615261 ot 13 avgusta 2010 g. ROSPATENT.*
5. Vizualizatsiya kompleksnogo antropogennogo vozdeystviya na vozdushnyuyu sredu territorii Irkutskoy oblasti / Ye.A. Musikhina, L.Yu. Dmitriyeva, O.S. Mikhaylova // *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2014611218 ot 28 yanvarya 2014 g. ROSPATENT.*
6. Razrabotka tekhnologicheskoy skhemy sistemy gosudarstvennogo ekologicheskogo monitoringa / Ye.A. Musikhina, O.S. Mikhaylova // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii.* – M: Akademiya Yestestvoznaniya. – 2012. – S. 63–65.
7. Zhavoronkov, Yu. M. Natsionalnaya sistema upravleniya chistotoy vozdushnogo basseyna SSHA: obzornaya informatsiya / Yu. M. Zhavoronkov. VNIIGMI–MTSD. Obninsk, 1980. – 50 s.
8. Pinigin, M.A. Rol otsenki opasnosti zagryazneniya v okhrane atmosfernogo vozdukh gorodov / M.A. Pinigin // *Sb. tr. In–ta obshchey i kommunalnoy gigiyeny im. A.N. Sysina.* – 1976. – Vyp. 3. – S. 14–19.
9. Musikhina, Ye.A. Issledovaniye vliyaniya faktora vremeni na otsenku sostoyaniya okruzhayushchey sredy v usloviyakh raboty gornodobyvayushchikh predpriyatiy / Ye.A. Musikhina. – Irkutsk: Izd–vo IrGTU, 2007. – 90 s.
10. Musikhina, Ye.A. Metodologicheskii aspekt tekhnologii kompleksnoy otsenki ekologicheskoy yemkosti territoriy / Ye.A. Musikhina. – M.: Izdatelstvo «Akademiya Yestestvoznaniya», 2009. – 137 s.
11. Mikhaylova, O.S. Programma «vizualizatsiya kompleksnogo antropogennogo vozdeystviya na vozdushnyuyu sredu territorii Irkutskoy oblasti» / O.S. Mikhaylova, L.Yu. Dmitriyeva, Ye.A. Musikhina // *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii.* – M.: Gosuniversitet – UNPK. – 2014. – S. 31–38.
12. Burman, V.M. Avtomatizirovannaya raspredelennaya sistema ekologicheskogo monitoringa okruzhayushchey sredy modulnogo tipa / V.M. Burman, Yu.A. Kropotov // *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii.* – 2008. – № 1–2. – S. 53–57.
13. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti za 2007 – 2011 g.g.: gos. dokl. Irkutsk: Forvard.
14. Informatsionno–analiticheskiy byulleten «Otsenka vliyaniya faktorov sredy obitaniya na zdorovye naseleeniya Irkutskoy oblasti v 2012 godu» // *upravleniye Federalnoy sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka po irkutskoy oblasti, 2013.* – 27 s.

Mihaylova Olga Sergeevna
Irkutsk State Technical University,
Irkutsk
Graduate student,
Ph.: 75–304, 8–950–100–46–75
E–mail: mikhaylova.istu@gmail.com

Bulaeva Nurzhagan Maisovna
«Center of the dual monitor environment and natural resources»
Makhachkala.
Ph.D., professor, director of «Center of the dual monitor environment and natural resources»,
Ph.: 8–8722–94–00–97
E–mail: monitoringst@mail.ru

Musihina Elena Alekseevna
Irkutsk State Technical University,
Irkutsk
Ph.D., professor,
Ph.: 8–950–05–07–424
E–mail: elena.science@yandex.ru

АЛГОРИТМ САМОДИАГНОСТИКИ И КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ПИЛОТАЖНО–НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В данной статье автор предлагает реализацию алгоритма самодиагностики и коррекции режима работы пилотажно–навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата самолетного типа. Алгоритм позволяет автоматически изменять закон управления в случае отказа оборудования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, пилотажно–навигационный комплекс, алгоритм, самодиагностика, режим работы, закон управления, вектор состояния оборудования.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) позволяют решить широкий спектр как бытовых, так и военных задач. Небольшие БПЛА доставляют почту, в то время как крупные отслеживают передвижение единиц военной техники и наносят ракетные удары. Главную роль в этом играет система управления, включающая в себя приводы, датчики, системы обработки информации, устройства передачи команд и образующая пилотажно–навигационный комплекс (ПНК). Посредством ПНК осуществляется взаимодействие оператора и БПЛА, а также ведется контроль над выполнением поставленной задачи. На рисунке 1 представлена структурная схема ПНК.

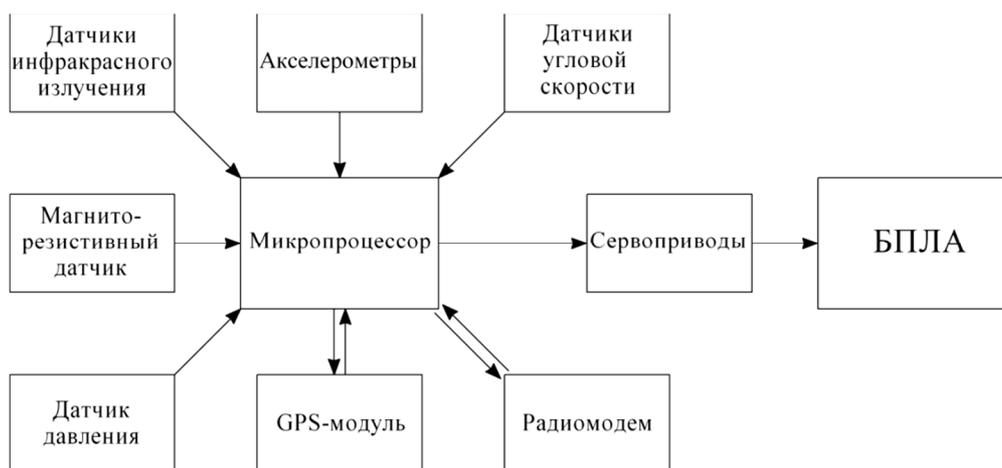


Рисунок 1 – Структурная схема ПНК

В состав разрабатываемого ПНК входят датчики угловой скорости, акселерометры, пирометрическая система ориентации, магнитометры, датчик давления, телеметрическая система, модуль GPS. Законы управления БПЛА основаны на комплексировании данных, полученных от разных измерительных систем. Это позволяет повысить точность определения углов ориентации. Однако отказ одной из них приведет к сбою в работе ПНК, и тем самым к потере контроля над БПЛА. Поэтому возникает необходимость в создании алгоритма, способного проводить мониторинг состояния датчиков, производить автоматическую коррекцию режима работы ПНК и предупредить оператора о возникшей проблеме.

Для реализации такого алгоритма каждой измерительной системе или датчику, именуемому в дальнейшем «объект контроля», присваивается поле допустимых значений, а также ставится в соответствие логическая переменная x_i , принимающая значение 1 в случае, если данные от объекта контроля получены и принадлежат полю допустимых значений. В случае если данные не получены или получены, но не принадлежат полю допустимых значений, переменная x_i принимает значение 0:

$$x_i = A_i \wedge B_i,$$

где A_i – логическая переменная, представляющая результат проверки условия получения данных от объекта контроля;

B_i – логическая переменная, представляющая результат проверки условия того, что данные, полученные от объекта контроля, принадлежат полю допустимых значений.

Таким образом, можно сформировать вектор состояния оборудования (ВСО) БПЛА:

$$\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Для каждого значения ВСО должен быть предусмотрен определенный закон управления БПЛА, реализованный в форме режиме ПНК. К примеру, в случае отказа пирометрической системы, задействуется режим с использованием датчиков угловой скорости и акселерометров; при потере связи с оператором, ПНК задействует режим возвращения на базу. В случае отказа системы связи с оператором, а также модуля GPS, возвращение на базу станет невозможным, поэтому будет выполнен переход в аварийный режим. Также существуют режимы, условиям работы которых удовлетворяют сразу несколько значений ВСО. Например, режим полета с ручным управлением отличается от режима демонстрации ручного управления только программной реализацией, но не условиями выполнения. В связи с этим возникает необходимость формирования вектора доступных режимов работы (ВДР), при текущем значении ВСО. Для этого производится умножение матрицы–маски M на ВСО. Каждая строка матрицы M соответствует определенному режиму работы ПНК, а столбец – объекту контроля (рисунок 2). Значение элемента строки равно 1 в том случае, если соответствующий ему объект контроля используется в реализации данного режима, и равно 0 в противоположном случае.

| | | Объекты контроля | | | | | | |
|-------|--------------------|--------------------------|---------------|-------------|----------------------|-----------------|------------|------------|
| | | Датчики угловой скорости | Акселерометры | Магнитометр | Инфракрасные датчики | Датчик давления | GPS-модуль | Радиомодем |
| Режим | Старт, ожидание | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Ручное управление | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | Полуавтоматический | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | Автоматический | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | Аварийный | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Рисунок 2 – Матрица–маска режимов M

Таким образом, в результате умножения матрицы–маски M на ВСО формируется вектор рангов \bar{R} . Каждый из элементов вектора рангов соответствует определенному режиму работы. В случае если значение ВСО удовлетворяет условиям данного режима работы, соответствующий элемент вектора \bar{R} принимает строго определенное значение:

$$\bar{R} = M \cdot \bar{X}.$$

После проверки элементов вектора рангов можно сформировать ВДР, элементы которого могут принимать значения «недоступен» или «доступен» (0 и 1 соответственно). Режим считается доступным, если для элемента ВДР выполняется условие:

$$r_i = d_i,$$

где d_i – референсные значения.

В процессе работы ПНК значение ВСО может измениться так, что текущий режим работы станет недоступным. В этом случае, на основании ВДР, должен быть задействован режим с более низким приоритетом. Иерархия режимов представлена на рисунке 3. Стоит обратить внимание на то, что ПНК не может перейти из автоматического режима в полуавто-

матический, также как и из полуавтоматического в ручной. При таких переходах оператору БПЛА требуется незамедлительно изменить принцип управления, что не всегда возможно и может привести к крушению.

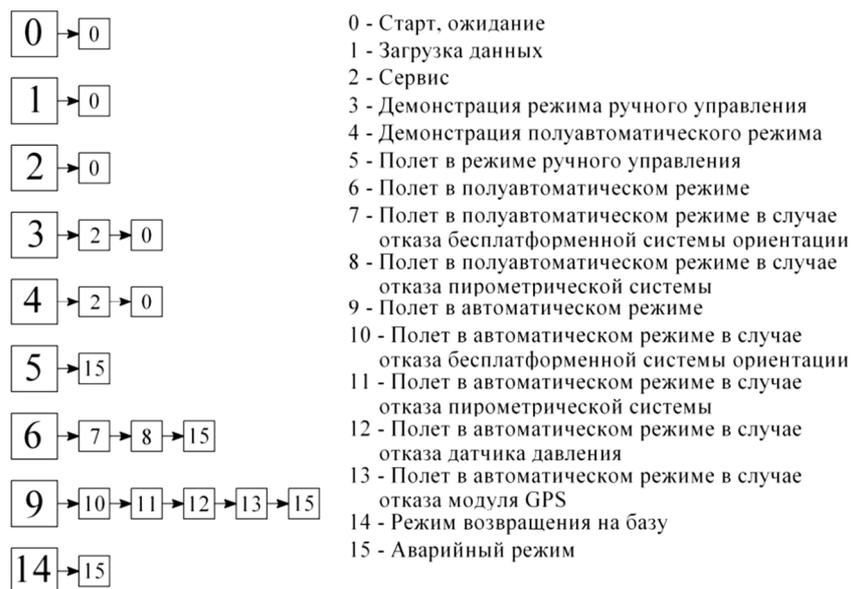


Рисунок 3 – Иерархия режимов

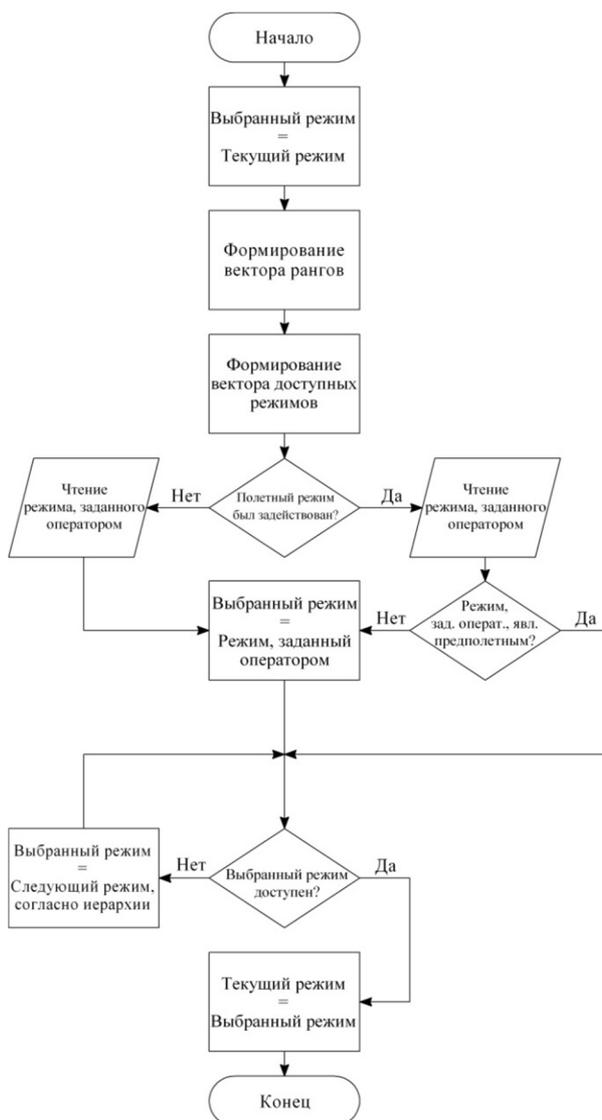


Рисунок 4 – Алгоритм самодиагностики и коррекции режима работы ПНК БПЛА

Таким образом, если альтернативные режимы полуавтоматического или автоматического управления не могут быть применены – задействуется аварийный режим. Аварийный режим имеет самый низкий приоритет и заключается в остановке двигателя, установки рулей в нейтральное положение и выбросе парашюта (при его наличии).

Алгоритм самодиагностики и коррекции режима работы ПНК БПЛА представлен на рисунке 4.

В начале алгоритма выбранному режиму работы присваивается значение текущего режима, после чего на основании ВСО формируется вектор рангов и ВДР. Далее выполняется чтение режима, заданного оператором, значение которого присваивается выбранному режиму. При этом учитывается то, что во время полета БПЛА не может быть задействован один из предполетных режимов, таких как режим калибровки или режим демонстрации. В случае поступления команды перехода в один из предполетных режимов в процессе полета – команда игнорируется. Далее происходит проверка возможности использования выбранного режима работы на основании ВДР. Если режим доступен, то текущему режиму работы ПНК присваивается значение выбранного режима и алгоритм завершается, в противном случае – выбранному режиму работы присваивается значение режима с более низким приоритетом в соответствии с иерархией, после чего вновь проходит проверка возможности использования выбранного режима работы. Цикл будет продолжаться до тех пор, пока выбранный режим не окажется доступным или аварийным.

ПНК реализован на базе микропроцессора STM32F407VGT, входящего в состав макетной платы STM32F4–Discovery (рисунок 5). В состав ПНК входят: датчики угловой скорости LPY510AL, акселерометры LIS302DL, баровысотометр на базе датчика давления MPXH6115A, пирометрическая система ориентации, основанная на базе инфракрасных датчиков MLX90614, система навигации на базе GPS–модуля LEA–4A, аппаратура управления Spektrum DX6i, цифровой телеметрический канал на базе радиомодема APC–240.

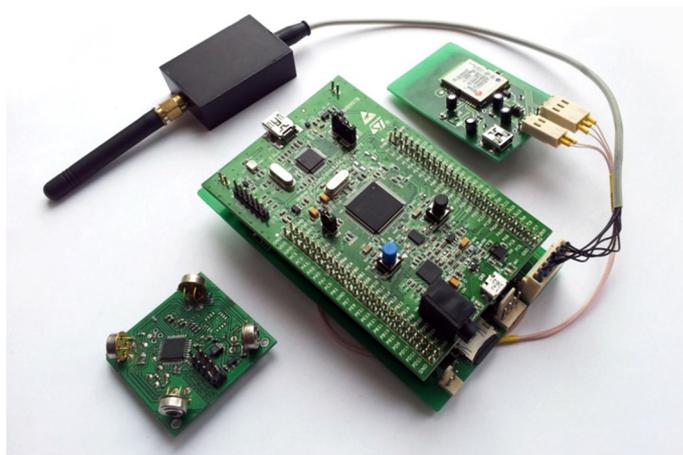


Рисунок 5 – Внешний вид ПНК на базе макетной платы STM32F4–Discovery

Подводя итог, можно сказать, что представленный алгоритм самодиагностики и коррекции режима работы ПНК позволяет оперативно корректировать закон управления БПЛА в случае отказа оборудования, что повышает надежность и обеспечивает стабильную работу в ходе выполнения поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репников, А.В. Задачи программно–алгоритмического обеспечения навигационно–пилотажного комплекса / А.В. Репников, Ю.В. Мручко, А.В. Вальдовский – М.: Изд–во МАИ, 1990. – 84 с.
2. Рябцев, М.В. Определение зависимости угла возвышения оптической оси пирометрического датчика, направленной под углом к продольной оси беспилотного летательного аппарата, от углов тангажа и крена / М.В. Рябцев // VIII Региональная молодёжная научно–практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов; под общ. ред. д–ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А.: в 3 ч. – Тула: Изд–во ТулГУ. – 2014. – Ч. II. – 244 с.

3. Рябцев, М.В. Определение углов тангажа и крена беспилотного летательного аппарата при известных углах возвышения оптических осей двух пиromетрических датчиков, расположенных под углом к продольной оси беспилотного летательного аппарата / М.В. Рябцев // VIII Региональная молодёжная научно–практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов; под общ. ред. д–ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А.: в 3 ч. – Тула: Изд–во ТулГУ. – 2014. – Ч. II. – 244 с.

4. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под. ред. В.Я. Распопова. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.

5. Корсунов, Н.И. Обнаружение и коррекция ошибок в информационно–измерительных системах энергетики / Н.И. Корсунов, А.А. Начетов // Сетевое научное издание «Информационные ресурсы, системы и технологии» ЭЛ № ФС 77 – 51946 [Электронный ресурс]. URL: <http://irsit.ru/>.

Рябцев Максим Вадимович

Тульский государственный университет, г. Тула

Аспирант кафедры «Приборы управления»

Тел.: +7(915) 682–08–90

E–mail: ryabtseff.max@yandex.ru

M.V. RYABTSEV

**ALGORITHM OF DIAGNOSIS AND OPERATING MODE CORRECTION
FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHT COMPLEX**

In this article the author proposes implementation of diagnosis and self–correction algorithm for mode of unmanned aerial vehicle flight complex. The algorithm can automatically change the control law in case of equipment failure.

Keywords: *an unmanned aerial vehicle, flight and navigation system, algorithm, self–test, mode of operation, the control law, the equipment state vector.*

BIBLIOGRAPHY

1. Repnikov, A.V. Zadachi programmno–algoritmicheskogo obespecheniya navigatsionno–pilotazhnogo kompleksa / A.V. Repnikov, YU.V. Mruchko, A.V. Valdovskiy – М.: Изд–во МАИ, 1990. – 84 с.

2. Ryabtsev, M.V. Opredeleniye zavisimosti ugla vozvysheniya opticheskoy osi pirometricheskogo datchika, napravlennoy pod uglom k prodolnoy osi bespilotnogo letatel'nogo apparata, ot uglov tangazha i krena / M.V. Ryabtsev // VIII Regionalnaya molodozhnaya nauchno–prakticheskaya konferentsiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta «Molodezhnyye innovatsii»: sbornik dokladov; pod obshch. red. d–ra tekhn. nauk, prof. Yadykina Ye.A.: v 3 ch. – Тула: Изд–во ТулГУ. – 2014. – Ч. II. – 244 с.

3. Ryabtsev, M.V. Opredeleniye uglov tangazha i krena bespilotnogo letatel'nogo apparata pri izvestnykh uglakh vozvysheniya opticheskikh osey dvukh pirometricheskikh datchikov, raspolzhenykh pod uglom k prodolnoy osi bespilotnogo letatel'nogo apparata / M.V. Ryabtsev // VIII Regionalnaya molodozhnaya nauchno–prakticheskaya konferentsiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta «Molodezhnyye innovatsii»: sbornik dokladov; pod obshch. red. d–ra tekhn. nauk, prof. Yadykina Ye.A.: v 3 ch. – Тула: Изд–во ТулГУ. – 2014. – Ч. II. – 244 с.

4. Mikrosistemy oriyentatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov / Pod. red. V.YA. Raspopova. – М.: Mashinostroyeniye, 2011. – 184 с.

5. Korsunov, N.I. Obnaruzheniye i korrektsiya oshibok v informatsionno–izmeritel'nykh sistemakh energetiki / N.I. Korsunov, A.A. Nachetov // Setevoye nauchnoye izdaniye «Informatsionnyye resursy, sistemy i tekhnologii» EL № FS 77 – 51946 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://irsit.ru/>.

Ryabtsev Maxim Vadimovich

Tula State University, Tula

Graduate student of «Control systems» Department

Ph.: +7 (915) 682–08–90

E–mail: ryabtseff.max@yandex.ru

М.А. ЛЕБЕДЕВ, А.Т. КИЗИМОВ, Р.Ч. ТАРГАМАДЗЕ

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье выполнен сравнительный анализ алгоритмов оценивания навигационных параметров легкого беспилотного летательного аппарата на основе обобщенного фильтра Калмана первого и второго порядков и сигма-точечных фильтров с различными базовыми множествами сигма-точек. Приводятся вычислительные затраты алгоритмов и данные имитационного моделирования для движения летательного аппарата по сложной траектории при воздействии турбулентной атмосферы.

Ключевые слова: обобщенный фильтр Калмана; сигма-точечный фильтр; нелинейный процесс; комплексирование; легкий беспилотный летательный аппарат.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различных типов активно используются в военной и гражданской сферах. Востребованными классами беспилотной авиации [1] являются мини-БПЛА (МБПЛА) самолетного типа массой до 5 кг и дальностью полета до 40 км, а также легкие БПЛА (ЛБПЛА) массой до 50 кг малого (до 70 км) и среднего (до 100 км) радиуса действия.

Успешное выполнение полетного задания БПЛА связано с обеспечением навигационной системой заданной точности, доступности и непрерывности показаний [2]. Наиболее целесообразной для МБПЛА и ЛБПЛА схемой построения навигационной системы является комплексирование показаний бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и ряда внешних навигационных систем, таких как барометрический высотомер, лазерный высотомер, спутниковая навигационная система, магнитный компас.

Распространенным методом комплексирования является калмановская фильтрация, оптимальная по критерию минимума среднеквадратической ошибки для линейных систем. Широко используемые в навигационных алгоритмах кинематические уравнения движения БПЛА, а в ряде случаев и уравнения модели измерения, связывающей оцениваемый вектор состояния с вектором непосредственно измеряемых величин, являются нелинейными. В этой связи представляет интерес исследование алгоритмов оценивания, учитывающих нелинейности модели процесса и измерения и в то же время обладающих сравнительно малыми вычислительными затратами, таких как обобщенный фильтр Калмана порядка выше первого, сигма-точечные алгоритмы и др. [3]

Существующие исследования [4–6] указывают на уменьшение погрешностей оценивания навигационных параметров при использовании фильтров, учитывающих нелинейность оцениваемого процесса, по сравнению с алгоритмом обобщенного фильтра Калмана (ОФК) первого порядка. Так, в [4] показано, что для режима работы БИНС без коррекции использование алгоритмов, учитывающих нелинейность модели процесса и измерения, приводит к уменьшению погрешности оценивания горизонтальных координат по сравнению с ОФК первого порядка на 5 – 17 %. По результатам моделирования [5] для МБПЛА вертолетного типа, движущегося по сложной траектории, уменьшение погрешности оценивания координат и скорости при использовании сигма-точечного алгоритма с симметричным базовым множеством точек составляет 9 – 10 % по сравнению с ОФК.

Вместе с тем, в работах [4, 6] рассматриваются случаи идеализированного движения объекта – равноускоренное движение и движение по кругу с постоянной скоростью [4], либо последовательные повороты вокруг каждой из осей ЛА с постоянной угловой скоростью [6]. Кроме того, во всех указанных работах не исследуются модификации сигма-точечного алгоритма, направленные на уменьшение вычислительных затрат за счет сокращения числа точек используемого базового множества. В [7] показано, что для случая двумерной навигации наземного объекта увеличение погрешностей подробных алгоритмов невелико по сравнению с алгоритмом на основе симметричного базового множества.

В данной статье выполнено сравнение алгоритмов оценивания на основе обобщенного фильтра Калмана первого и второго порядка, и сигма-точечных алгоритмов с симметрич-

ным и минимальным ассиметричным базовым множеством в реалистичных условиях полета ЛБПЛА самолетного типа по сложной траектории при воздействии турбулентной атмосферы. Приведенные алгоритмы рассчитаны на применение в малогабаритном пилотажно-навигационном комплексе (ПНК) [8] для ЛБПЛА малого радиуса действия.

Показания датчиков первичной информации, используемых в ПНК [8], представляют собой дискретные по времени сигналы, поэтому при построении алгоритма оценивания навигационных параметров ЛА удобно использовать дискретную модель движения.

В качестве целевой системы координат (СК) выбрана нормальная земная СК (НЗСК) [9], что является достаточным приближением для описания движения ЛА при ограниченной дальности полета (70 – 100 км). Вектор ускорения свободного падения \mathbf{g} считается постоянным и заданным в проекциях на оси НЗСК, угловая скорость вращения Земли не учитывается вследствие малости ее значения по сравнению с погрешностями инерциальных датчиков (модуль угловой скорости вращения Земли составляет $\Omega_E = 7,292115 \times 10^{-5}$ рад/с при среднеквадратическом отклонении шума микромеханических датчиков угловых скоростей (ДУС) порядка $\sigma_\omega = 1 \times 10^{-2}$ рад/с).

Основными составляющим погрешности инерциальных датчиков считаются смещение «нуля», погрешность масштабного коэффициента (МК) и аддитивный шум датчиков. Вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_k^{(b,c)}$ и вектор кажущегося ускорения ЛА $\mathbf{n}_k^{(b,c)}$ в проекциях на оси связанной с ЛА системы координат (ССК) на шаге k с учетом погрешностей определяются выражениями:

$$\boldsymbol{\omega}_k^{(b,c)} = \text{diag}(\mathbf{k}_k^{(\omega)}) \cdot (\boldsymbol{\omega}_k^{(m)} - \mathbf{b}_k^{(\omega)} - \boldsymbol{\xi}_k^{(\omega)}), \quad (1)$$

$$\mathbf{n}_k^{(b,c)} = \text{diag}(\mathbf{k}_k^{(n)}) \cdot (\mathbf{n}_k^{(m)} - \mathbf{b}_k^{(n)} - \boldsymbol{\xi}_k^{(n)}), \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_k^{(\omega)}$ – величины, определяющие отклонения МК ДУС;

$\boldsymbol{\omega}_k^{(m)}$ – измеряемое значение вектора угловой скорости ЛА в ССК;

$\mathbf{b}_k^{(\omega)}$ – смещения «нулей» ДУС;

$\mathbf{k}_k^{(n)}$ – величины, определяющие отклонения МК акселерометров;

$\mathbf{n}_k^{(m)}$ – измеряемое значение вектора кажущегося вектора ускорения ЛА в ССК;

$\mathbf{b}_k^{(n)}$ – смещения «нулей» акселерометров.

Шумы датчиков $\boldsymbol{\xi}_k^{(\omega)}$, $\boldsymbol{\xi}_k^{(n)}$ моделируются некоррелированными гауссовскими случайными последовательностями с нулевым математическим ожиданием.

Компоненты векторов $\mathbf{k}_k^{(\omega)}$, $\mathbf{k}_k^{(n)}$ имеют значения вблизи единицы и связаны с отклонениями масштабных коэффициентов датчиков $\kappa_k^{(\omega)}$, $\kappa_k^{(n)}$ соотношениями вида:

$$k_{axis, k}^{(\dots)} = (1 + \kappa_{axis, k}^{(\dots)})^{-1},$$

где $axis = \{X, Y, Z\}$ – индекс оси ССК.

Погрешности акселерометров и ДУС являются медленно изменяющимися величинами, и в промежутках между коррекцией БИНС принимаются квазипостоянными:

$$\mathbf{b}_k^{(\omega)} = \mathbf{b}_{k-1}^{(\omega)}, \mathbf{b}_k^{(n)} = \mathbf{b}_{k-1}^{(n)}, \mathbf{k}_k^{(\omega)} = \mathbf{k}_{k-1}^{(\omega)}, \mathbf{k}_k^{(n)} = \mathbf{k}_{k-1}^{(n)}. \quad (3)$$

Модель движения ЛА задается следующими разностными уравнениями:

$$\mathbf{L}_k^{(e)} = \mathbf{L}_{k-1}^{(e)} + \mathbf{D}_{k-1}^{(b \rightarrow e)} \cdot \mathbf{V}_{k-1}^{(b)} \cdot \Delta t + \mathbf{n}_{k-1}^{(e, tr)} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}, \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_k^{(b)} = \mathbf{V}_{k-1}^{(b)} + \mathbf{n}_{k-1}^{(b, tr)} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_{k-1} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{q}_{k-1} \circ \left(\frac{[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b,c)}] + [\boldsymbol{\omega}_k^{(b,c)}]}{2} \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_{k-1}^{(e, tr)} = \mathbf{D}_{k-1}^{(b \rightarrow e)} \cdot \mathbf{n}_{k-1}^{(b, c)} + \mathbf{g}, \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_{k-1}^{(b, tr)} = \mathbf{n}_{k-1}^{(b, c)} - \boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b, c)} \times \mathbf{V}_{k-1}^{(b)} + \mathbf{D}_{k-1}^{(e \rightarrow b)} \cdot \mathbf{g}, \quad (8)$$

где $\mathbf{L}_{k-1}^{(e)}$ – радиус–вектор ЛА, заданный в проекциях на оси НЗСК (e);

$\mathbf{D}_{k-1}^{(b \rightarrow e)}$ – матрица направляющих косинусов, определяющая переход от ССК (b) к НЗСК;

$\mathbf{V}_{k-1}^{(b)}$ – вектор скорости ЛА относительно Земли в проекциях на оси ССК;

Δt – период дискретизации;

$\mathbf{n}_{k-1}^{(e, tr)}$ – вектор ускорения поступательного движения ЛА в проекциях на оси НЗСК;

$\mathbf{n}_{k-1}^{(b, tr)}$ – вектор ускорения поступательного движения ЛА в проекциях на оси ССК;

$\mathbf{q}_{k-1}^T = [q_{0, k-1} \quad \bar{\mathbf{q}}_{k-1}^T]$ – представленные в виде кватерниона параметры Родрига–Гамильтона, описывающие ориентацию ЛА, $q_{0, k-1}$ и $\bar{\mathbf{q}}_{k-1}$ – скалярная и векторная части кватерниона соответственно;

$\mathbf{D}_{k-1}^{(e \rightarrow b)}$ – матрица направляющих косинусов, определяющая переход от НЗСК к ССК.

Матрицы направляющих косинусов $\mathbf{D}_{k-1}^{(b \rightarrow e)}$, $\mathbf{D}_{k-1}^{(e \rightarrow b)}$ вычисляются по параметрам Родрига–Гамильтона [10]; знаком \circ обозначено кватернионное умножение.

Величины $[\boldsymbol{\omega}_k^{(b, c)}]$, $[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b, c)}]$ являются кватернионами, представляющими собой гиперкомплексные отображения [10] векторов $\boldsymbol{\omega}_k^{(b, c)}$, $\boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b, c)}$:

$$[\boldsymbol{\omega}_k^{(b, c)}] = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega}_k^{(b, c)} \end{bmatrix}, \quad [\boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b, c)}] = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega}_{k-1}^{(b, c)} \end{bmatrix}.$$

Единичная норма кватерниона ориентации \mathbf{q}_k поддерживается нормализацией кватерниона на каждом шаге.

Использование в (6) значений угловой скорости на предыдущем и на текущем шаге вычислений позволяет снизить ошибки численного метода при возможных резких эволюциях ЛА, связанных с маневрами и воздействием атмосферных возмущений. В то же время, введение в уравнения для радиус–вектора и скорости ЛА значения ускорения на текущем шаге $\mathbf{n}_k^{(b, c)}$ незначительно влияет на погрешности численного метода, поэтому для упрощения уравнений величина $\mathbf{n}_k^{(b, c)}$ не используется.

Разлагая уравнения модели процесса (1) – (8) в ряды Тейлора в окрестности вектора состояния \mathbf{x}_{k-1} и определяя математическое ожидание $\bar{\mathbf{x}}_k$ и матрицу ковариации $\mathbf{P}_k^{(xx)}$ вектора состояния \mathbf{x}_k , можно показать, что вторые и последующие слагаемые полученных выражений представляют собой сумму произведений компонент векторов угловой и линейной скорости и параметров ориентации ЛА в различных сочетаниях на моменты распределения вектора состояния \mathbf{x}_{k-1} . Вторые слагаемые рядов зависят от дисперсии параметров ориентации и некоторых недиагональных элементов матрицы ковариации $\mathbf{P}_{k-1}^{(xx)}$, таких как ковариация компонент вектора скорости и компонент кватерниона ориентации, компонент кватерниона и погрешностей ДУС. Для третьих и последующих слагаемых рядов, содержащих третьи и т. д. моменты распределения \mathbf{x}_{k-1} , в случае нормального распределения \mathbf{x}_{k-1} можно вывести зависимость от указанных элементов матрицы ковариации $\mathbf{P}_{k-1}^{(xx)}$, воспользовавшись теоремой Иссерлиса. Таким образом, нелинейность модели процесса должна сильнее проявляться при большой неопределенности ориентации БПЛА и при его эволюциях.

В случае нелинейных моделей процесса и измерения вычисление математического ожидания и матрицы ковариации оцениваемого вектора состояния и вектора измерения в рамках калмановской фильтрации представляет собой задачу определения статистических моментов многомерной случайной величины, подвергшейся нелинейному преобразованию [3]. Данная задача может решаться с помощью разложения уравнений модели в ряды Тейлора с сохранением первых слагаемых рядов (обобщенный фильтр Калмана), с помощью аппроксимации распределения вектора состояния множеством случайно выбранных точек в пространстве состояний (метод Монте–Карло) [11] или детерминированным множеством точек (сигма–точечное преобразование) [5–7]. Последний метод обеспечивает аппроксимацию распределения с точностью до двух первых моментов, но отличается меньшими вычислительными затратами по сравнению с методом Монте–Карло, так как использует меньшее число точек, и предпочтителен для систем реального времени.

Аппроксимации распределения случайной величины в сигма–точечном преобразовании строится на основе группы:

$$\{\mathbf{v}, w_M, w_C\},$$

где \mathbf{v} – базовое множество сигма–точек, имеющее нулевое математическое ожидание и единичную матрицу ковариации;

w_M – множество весов для вычисления математических ожиданий;

w_C – множество весов для вычисления матриц ковариации.

Выбор базового множества \mathbf{v} наряду с размерностью оцениваемого вектора состояния определяет вычислительные затраты алгоритма оценивания, а также оказывает влияние на погрешности оценивания вследствие различной ошибки аппроксимации моментов третьего и более высоких порядков для разных базовых множеств.

При построении алгоритма навигационной системы исследовалось комплексирование датчиков на основе обобщенного фильтра Калмана первого (ОФК1) и второго порядков (ОФК2), и на основе сигма–точечного преобразования, использующего симметричное базовое множество из $2n + 1$ точек [5, 6], (СТП1) и ассиметричное множество минимальной размерности из $n + 1$ точки [12] (СТП2).

В рассматриваемых алгоритмах параметры Родрига–Гамильтона исключены из непосредственно оцениваемого вектора состояния, чтобы избежать нарушения единичной нормы кватерниона при вычислении апостериорной оценки вектора состояния (шаг коррекции) и при операциях сигма–точечного преобразования. Кватернион ориентации ЛА представлен как произведение опорного кватерниона $\mathbf{q}_k^{(ref)}$ и кватерниона, определяющего поворот из положения, заданного $\mathbf{q}_k^{(ref)}$, в положение, соответствующее истинной ориентации ЛА, и являющегося функцией от трехкомпонентной группы параметров \mathbf{p} [13]:

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_k^{(ref)} \circ \delta\mathbf{q}(\mathbf{p}_k),$$

при этом нулевой вектор \mathbf{p} соответствует единичному кватерниону:

$$\delta\mathbf{q}^T(\mathbf{0}) = [1 \ 0].$$

За опорный кватернион $\mathbf{q}_k^{(ref)}$ принята оценка кватерниона ориентации $\hat{\mathbf{q}}_k$. Вектор \mathbf{p} , определяющий в этом случае ошибку ориентации, включен в оцениваемый вектор состояния. При подобном построении алгоритма оценивания вычисление апостериорной оценки кватерниона ориентации на шаге коррекции, а также формирование множества сигма–точек осуществляется с помощью операции кватернионного умножения, обеспечивающей сохранение единичной нормы кватерниона.

В качестве параметров \mathbf{p} может использоваться любая трехкомпонентная группа, описывающая ориентацию твердого тела. В рассматриваемых алгоритмах выбрана векторная часть кватерниона ошибки ориентации $\Delta\hat{\mathbf{q}}_k$, обеспечивающая простоту функции $\delta\mathbf{q}(\dots)$ и упрощающая вычисление частных производных уравнений движения ЛА.

Вычислительные затраты алгоритмов, определенные для четырех типов операций (сложение/вычитание (+), умножение/деление (\times), извлечение квадратного корня ($\sqrt{}$) и три-

гонометрические операции (\arctg)), приведены в таблице 1. Трудоемкость шага коррекции вычислена при размерности вектора измерения m , равной 7.

Таблица 1 – Вычислительные затраты алгоритмов оценивания.

| Шаг алгоритма | Число операций | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|----------------|-----------|
| | + | × | $\sqrt{\quad}$ | \arctg |
| Алгоритм ОФК первого порядка | | | | |
| Предсказание | 8224 | 8871 | 1 | 0 |
| Коррекция | 7126 | 8009 | 0 | 1 |
| Алгоритм ОФК второго порядка | | | | |
| Предсказание | 8776 | 9847 | 2 | 0 |
| Коррекция | 7227 | 8199 | 1 | 1 |
| Сигма–точечный алгоритм с симметричным базовым множеством сигма–точек | | | | |
| Предсказание | 25450 | 25529 | 137 | 0 |
| Коррекция | 17929 | 17715 | 1 | 55 |
| Аддитивный сигма–точечный алгоритм с сокращенным базовым множеством сигма–точек | | | | |
| Предсказание | 12597 | 13228 | 66 | 0 |
| Коррекция | 14091 | 14743 | 44 | 22 |

Исследование работы алгоритмов оценивания проводилось для различных величин начальных ошибок навигационных параметров ЛА, различных величин погрешностей инерциальных датчиков (таблица 2) и различной интенсивности воздействия турбулентной атмосферы (ТА) на БПЛА. Сбор полетных данных осуществлялся моделированием в приложении MATLAB Simulink движения ЛБПЛА размахом крыльев 3,45 м. Используемая нелинейная динамическая модель ЛА разработана в ОАО «КБ «Луч», г. Рыбинск, и подробно описана в [14]. Воздействие атмосферы на ЛА моделировалось с помощью блоков турбулентной атмосферы Turbulent Atmosphere (непрерывная модель Кармана, отвечающая отраслевому стандарту [15]) и ветрового среза Wind Shear библиотеки Aerospace BlockSet. Полет ЛА выполнялся при воздействии ТА малой, средней и большой интенсивности, параметры блоков устанавливались в соответствии с приведенной в описании библиотеки Aerospace BlockSet классификацией.

Среднеквадратическое отклонение шума акселерометров $\xi_k^{(n)}$ во всех случаях устанавливалось равным $9 \times 10^{-3} \text{ g} = 0,088 \text{ м/с}^2$, среднеквадратическое отклонение шума ДУС $\xi_k^{(o)}$ – равным 0,8 ‰. Частота опроса инерциальных датчиков составляла 100 Гц.

Таблица 2 – Погрешности инерциальных датчиков.

| Вид погрешности | Значения погрешности | | |
|------------------------------------------------|----------------------|---------|---------|
| | Малые | Средние | Большие |
| Смещение «нуля» ДУС, ‰ | 0,3 | 1,5 | 3,0 |
| Погрешность МК ДУС, ‰ | 0,5 | 1,0 | 5,0 |
| Смещение «нуля» акселерометров, м/с^2 | 0,05 | 0,2 | 0,5 |
| Погрешность МК акселерометров, ‰ | 0,5 | 1,0 | 5,0 |

В качестве корректирующих БИНС измерительных систем использовались спутниковая радионавигационная система, баровысотомер и магнитометр (таблица 3).

Таблица 3 – Корректирующие БИНС измерительные системы.

| Система | Показания | Частота обновления | СКО погрешности |
|----------------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|
| Спутниковая радионавигационная система | Координаты | 1 Гц | 11 м |
| | Горизонтальная скорость | | 0,05 м/с |
| | Вертикальная скорость | | 0,08 м/с |
| Баровысотомер | Высота | 100 Гц | 6 м |
| Магнитометр | Магнитный курс | 25 Гц | 1° |

ЛБПЛА выполнял движение по сложной траектории (рисунок 1), состоящей из участка набора высоты $A-B$ и нескольких «восьмерок» $B-C-D-E-B$, предполагающих помимо разворотов ЛА изменение высоты и скорости полета (высота и скорость полета в характерной точке траектории указана в скобках).

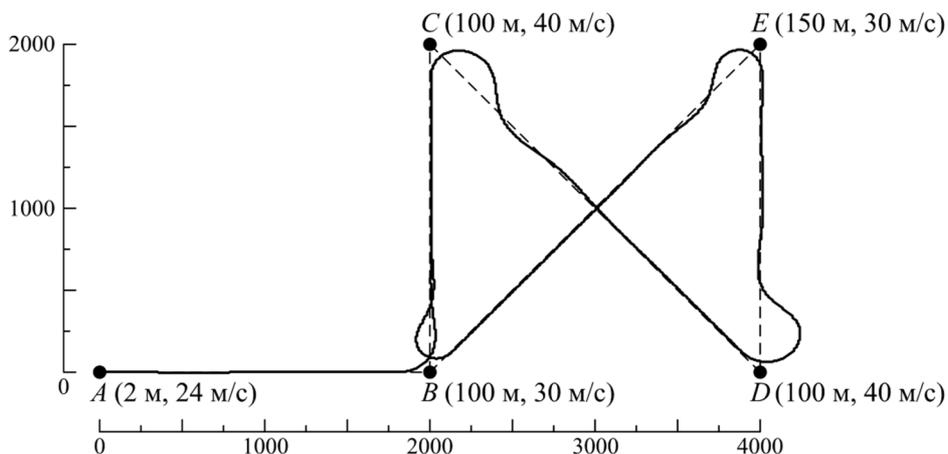


Рисунок 1 – Траектория движения ЛА
пунктиром обозначена заданная траектория, ТА средней интенсивности

При оценивании и постоянной коррекции погрешностей акселерометров и ДУС ошибки определения навигационных параметров ЛБПЛА практически не зависят от величины погрешностей датчиков для всех алгоритмов. Начальные ошибки координат и скорости ЛА также не оказывают влияние на ошибки оценивания, так как компоненты радиус-вектора и вектора скорости измеряются непосредственно. В то же время, величина начальных ошибок ориентации ЛА влияет на оценивание параметров ориентации и погрешностей акселерометров.

При неопределенности начальных углов ориентации порядка $1^\circ - 5^\circ$ нелинейность модели процесса проявляется слабо, независимо от эволюций БПЛА, вызванных в том числе и атмосферными возмущениями, так как элементы матрицы ковариации вектора состояния в режиме периодической коррекции БИНС оказываются малыми. В этом случае погрешности оценивания алгоритмов на основе ОФК и на основе сигма-точечного преобразования отличаются незначительно.

В таблице 4 приведены математические ожидания и среднеквадратические отклонения ошибок оценивания навигационных параметров при начальных ошибках крена, тангажа и рыскания ЛА, равных 3° , малых величинах погрешностей инерциальных датчиков и малой интенсивности воздействия турбулентной атмосферы.

Таблица 4 – Погрешности алгоритмов оценивания в установившемся режиме.

| Оцениваемая величина | $\Delta \bar{x}$ | | | | $\sigma(\Delta x)$ | | | |
|------------------------------|------------------|---------|---------|---------|--------------------|--------|--------|--------|
| | ОФК1 | ОФК2 | СТП1 | СТП2 | ОФК1 | ОФК2 | СТП1 | СТП2 |
| $\Delta L_{X,k}^{(e)}$, м | -0,1532 | -0,1531 | -0,1531 | -0,1512 | 0,6421 | 0,6419 | 0,6419 | 0,6416 |
| $\Delta L_{Y,k}^{(e)}$, м | -0,0359 | -0,0332 | -0,0331 | -0,0301 | 0,2062 | 0,2065 | 0,2065 | 0,2069 |
| $\Delta L_{Z,k}^{(e)}$, м | 0,0192 | 0,0191 | 0,0192 | 0,0097 | 0,5326 | 0,5327 | 0,5327 | 0,5368 |
| $\Delta V_{X,k}^{(e)}$, м/с | -0,0016 | -0,0016 | -0,0016 | -0,0016 | 0,0448 | 0,0448 | 0,0448 | 0,0447 |
| $\Delta V_{Y,k}^{(e)}$, м/с | -0,0029 | -0,0025 | -0,0025 | -0,0018 | 0,0326 | 0,0326 | 0,0326 | 0,0326 |
| $\Delta V_{Z,k}^{(e)}$, м/с | -0,0018 | -0,0018 | -0,0018 | -0,0019 | 0,0435 | 0,0435 | 0,0435 | 0,0435 |
| $\Delta \gamma$, $^\circ$ | -0,0143 | -0,0132 | -0,0132 | -0,0103 | 0,1477 | 0,1476 | 0,1476 | 0,1477 |
| $\Delta \theta$, $^\circ$ | 0,0070 | 0,0117 | 0,0122 | 0,0147 | 0,1368 | 0,1367 | 0,1367 | 0,1369 |
| $\Delta \psi$, $^\circ$ | 0,0158 | 0,0159 | 0,0160 | 0,0161 | 0,1278 | 0,1278 | 0,1278 | 0,1277 |

При ошибках начальной ориентации, равных 15° , алгоритмы на основе сигма-точечного преобразования обеспечивают лучшую сходимость оценок углов крена и тангажа и погрешностей акселерометров и меньшую ошибку оценивания последних в установившемся режиме (рисунок 2 – 4).

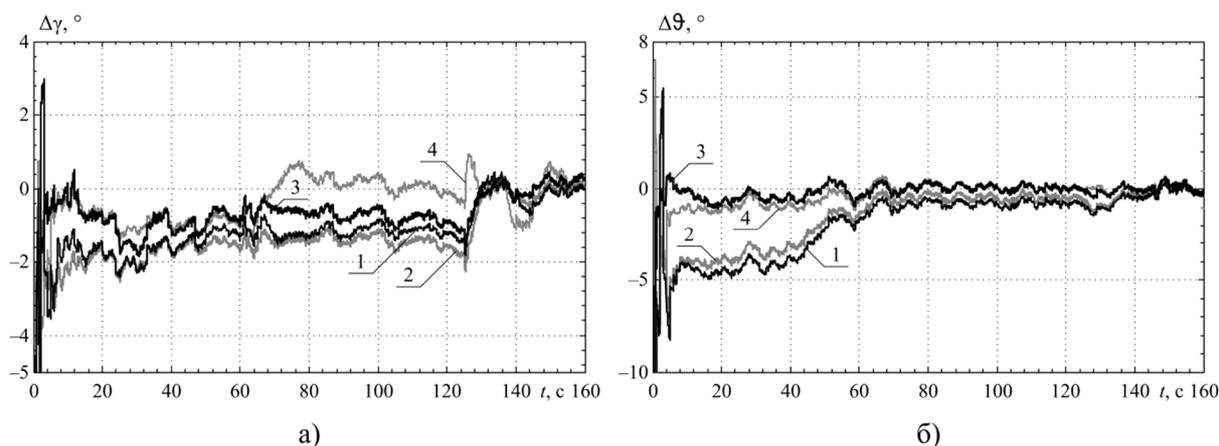


Рисунок 2 – Сходимость углов крена (а) и тангажа (б) при больших ошибках начальной ориентации для алгоритмов ОФК1 (1), ОФК2 (2), СТП1 (3), СТП2 (4)

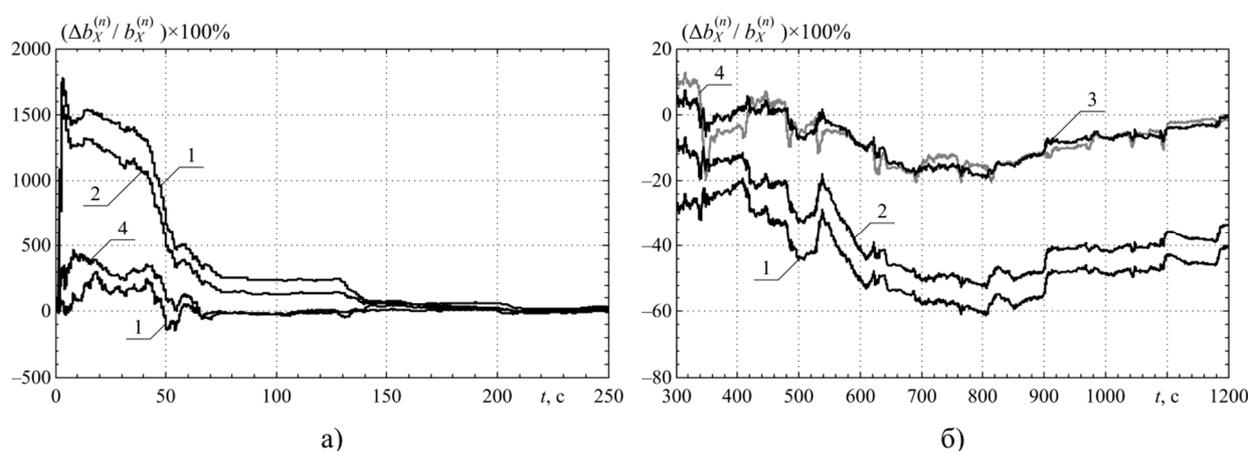


Рисунок 3 – Погрешности оценивания смещения «нуля» акселерометра по оси X для алгоритмов ОФК1 (1), ОФК2 (2), СТП1 (3), СТП2 (4) при больших ошибках начальной ориентации

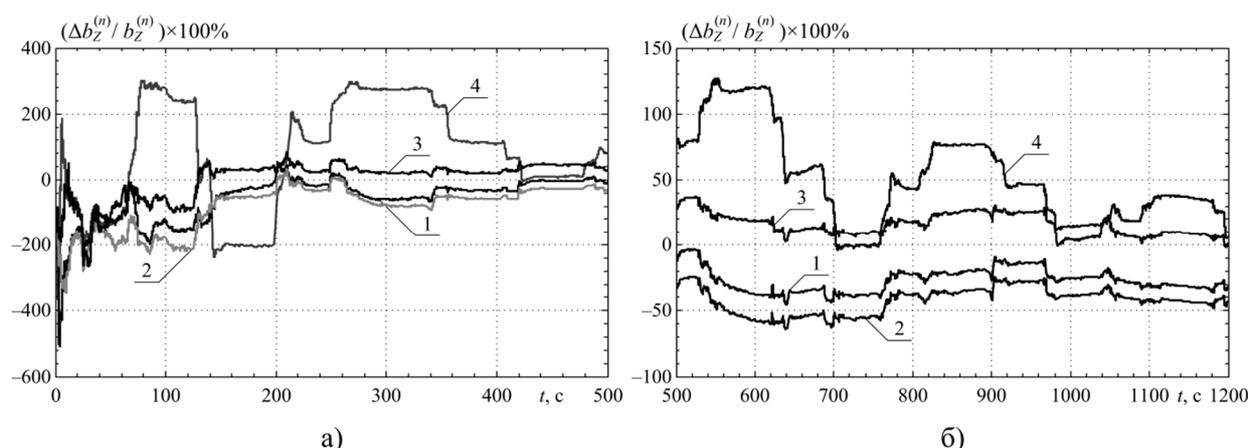


Рисунок 4 – Погрешности оценивания смещения «нуля» акселерометра по оси Z для алгоритмов ОФК1 (1), ОФК2 (2), СТП1 (3), СТП2 (4) при больших ошибках начальной ориентации

В рассматриваемом эксперименте начальное распределение компонент вектора состояния и распределение шумов имеет симметричный характер, поэтому алгоритм СТП1, использующий симметричное базовое множество сигма-точек, дает меньшие погрешности оценивания, чем алгоритм СТП2, для которого ошибка аппроксимации моментов третьего и более высоких порядков симметричного распределения больше, чем для СТП1. В частности, для алгоритма СТП2 имеет место значительно худшая сходимость смещения «нуля» акселе-

ности оценивания данного алгоритма сходятся к погрешностям оценивания алгоритма с симметричным базовым множеством.

Приведенные данные показывают, что погрешности оценивания алгоритмов калмановской фильтрации, учитывающих нелинейность уравнений движения БПЛА и модели измерения, при описании ориентации ЛА с помощью параметров Родрига–Гамильтона и сравнительно небольшой начальной неопределенности компонент вектора состояния незначительно отличаются от алгоритма ОФК первого порядка, основанного на линеаризации оцениваемого процесса. Величина погрешностей инерциальных датчиков и интенсивность воздействия турбулентной атмосферы на БПЛА не влияют на различия в ошибках оценивания рассматриваемых алгоритмов.

Вместе с тем, сигма–точечные алгоритмы обладают большей надежностью, обеспечивая лучшую начальную выставку системы при больших ошибках начальных условий. Вычислительные затраты указанных алгоритмов в 1,5 – 3 раза превышают затраты алгоритма первого порядка, однако данное обстоятельство может быть менее существенным при выборе алгоритма комплексирования в случае использования высокопроизводительных вычислительных средств и возможном распараллеливании процесса вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная классификация российских БПЛА [Электронный ресурс] // Missiles.ru. Ракетная техника: URL: http://www.missiles.ru/UAV_class.htm (дата обращения: 20.11.2014).
2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационно-технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 280 с.
3. Лебедев, М.А. Сравнительный анализ субоптимальных фильтров Калмана для оценивания нелинейных стохастических процессов в реальном времени / М.А. Лебедев, А.Т. Кизимов, А.Н. Лебедев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА, 2011. – № 1(19). – С. 129 – 136.
4. Конаков, А.С. Сравнительный анализ среднеквадратической погрешности определения координат объекта в бесплатформенной инерциальной навигационной системе при использовании различных алгоритмов нелинейной фильтрации / А.С. Конаков, В.В. Шаврин, В.И. Тисленко, А.А. Савин // Доклады ТУСУРа. – Томск: ТУСУР. – 2012. – № 1(25). – Ч 1. – С. 5 – 9.
5. Van der Merwe R., Wan E.A. Sigma–point Kalman Filters for Integrated Navigation // Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Dayton, OH, June 7 – 9. – 2004. – p.p. 641 – 654.
6. Crassidis, J.L. Sigma–point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2006. – Vol. 42. – Issue 2. – p.p. 750 – 756.
7. Castrejón Lozano J.G., Garca Carrillo L.R., Dzul A., Lozano R. Spherical Simplex Sigma–Point Kalman Filters: A Comparison in the Inertial Navigation of a Terrestrial Vehicle // Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, USA. – 2008. – p.p. 3536–3541.
8. Лебедев, М.А. Малогабаритный пилотажно–навигационный комплекс для беспилотных летательных аппаратов / М.А. Лебедев, Д.Р. Березин, А.В. Сенников, А.Т. Кизимов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА. – 2012. – № 2(23). – С. 38 – 41.
9. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – Введ. 01.07.1981 взамен ГОСТ 20058–74 (кроме пп. 45– 67). – М., 1980. – 54 с.
10. Бранец, Н.В. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Н.В. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.–мат. лит., 1992. – 280 с.
11. Haug, A.J. A Tutorial on Bayesian Estimation and Tracking Techniques Applicable to Nonlinear and Non–Gaussian Processes. MITRE Technical Report, MTR 05W0000004, January 2005. – 59 p.
12. Hu B., Chang L., Li A., Qin F. Comment on “Highly Efficient Sigma Point Filter for Spacecraft Attitude and Rate Estimation” // Mathematical Problems in Engineering. – Hindawi Publishing Corporation, 2012. – Volume 2012, Article ID 170391. – 5 p.
13. Markley, F.L. Attitude Error Representations for Kalman Filtering // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 2003. – Vol. 26. – № 2. – p.p. 311 – 317.
14. Летунов, Д.А. Оптимизация системы управления легкого беспилотного летательного аппарата по частотному критерию: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Летунов Дмитрий Александрович. – Рыбинск, 2011. – 144 с.
15. ОСТ 1 02514–84. Модель турбулентной атмосферы. Характеристики. – Введ. 01.01.1984. – М., 1984. – 14 с.

Лебедев Михаил Александрович
ОАО «Конструкторское бюро
«Луч», г. Рыбинск
Инженер 1–й категории
Email: lebedev_oct@mail.ru

Кизимов Алексей Тимофеевич
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы»
Email: kizimovat@mail.ru

Таргамдзе Реваз Чолаевич
ФГУП «Научно–производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки
Кандидат технических наук, ведущий специалист
E–mail: Targamadze@laspace.ru

M.A. LEBEDEV, A.T. KIZIMOV, R.CH. TARGAMADZE

ALGORITHMS FOR ESTIMATING NONLINEAR STOCHASTIC PROCESSES IN THE NAVIGATION SYSTEM IS EASILY UNMANNED AERIAL VEHICLES

The paper presents a comparative analysis of navigation estimators designed specifically for a small unmanned aerial vehicle including the first-order and second-order Extended Kalman Filters and the Unscented Kalman Filters with different base sets of sigma-points. Algorithms computational costs and simulation result for the case of aggressive flight in turbulent atmosphere are presented.

Keywords: *Extended Kalman Filter; Unscented Kalman filter; nonlinear process; sensors fusion; small unmanned aerial vehicle.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sovremennaya klassifikatsiya rossiyskikh BPLA [Elektronnyy resurs] // Missiles.ru. Raketnaya tekhnika: URL: http://www.missiles.ru/UAV_class.htm (data obrashcheniya: 20.11.2014).
2. Upravleniye i navedeniye bespilotnykh manevrennykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy / Pod red. M.N. Krasilshchikova i G.G. Serebryakova. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 280 s.
3. Lebedev, M.A. Sravnitelnyy analiz suboptimalnykh filtrov Kalmana dlya otsenivaniya nelineynykh stokhasticheskikh protsessov v realnom vremeni / M.A. Lebedev, A.T. Kizimov, A.N. Lebedev // Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Solovyeva. – Rybinsk: RGATA, 2011. – № 1(19). – S. 129 – 136.
4. Konakov, A.S. Sravnitelnyy analiz srednekvadraticheskoy pogreshnosti opredeleniya koordinat obyektov v besplatformennoy inertsiyalnoy navigatsionnoy sisteme pri ispolzovanii razlichnykh algoritmov nelineynoy filtratsii / A.S. Konakov, V.V. Shavrin, V.I. Tislenko, A.A. Savin // Doklady TUSURa. – Tomsk: TUSUR. – 2012. – № 1(25). – CH 1. – S. 5 – 9.
5. Van der Merwe R., Wan E.A. Sigma-point Kalman Filters for Integrated Navigation // Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Dayton, OH, June 7 – 9. – 2004. – p.p. 641 – 654.
6. Crassidis, J.L. Sigma-point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2006. – Vol. 42. – Issue 2. – p.p. 750 – 756.
7. Castrejón Lozano J.G., Garca Carrillo L.R., Dzul A., Lozano R. Spherical Simplex Sigma-Point Kalman Filters: A Comparison in the Inertial Navigation of a Terrestrial Vehicle // Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, USA. – 2008. – p.p. 3536–3541.
8. Lebedev, M.A. Malogabaritnyy pilotazhno-navigatsionnyy kompleks dlya bespilotnykh letatelnykh apparatov / M.A. Lebedev, D.R. Berezin, A.V. Sennikov, A.T. Kizimov // Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.A. Solovyeva. – Rybinsk: RGATA. – 2012. – № 2(23). – S. 38 – 41.
9. GOST 20058–80. Dinamika letatelnykh apparatov v atmosfere. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya. – Vved. 01.07.1981 vzamen GOST 20058–74 (krome pp. 45– 67). – M., 1980. – 54 s.
10. Branets, N.V. Vvedeniye v teoriyu besplatformennykh inertsiyalnykh navigatsionnykh sistem / N.V. Branets, I.P. Shmyglevskiy. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.–mat. lit., 1992. – 280 s.
11. Haug, A.J. A Tutorial on Bayesian Estimation and Tracking Techniques Applicable to Nonlinear and Non-Gaussian Processes. MITRE Technical Report, MTR 05W0000004, January 2005. – 59 p.
12. Hu B., Chang L., Li A., Qin F. Comment on “Highly Efficient Sigma Point Filter for Spacecraft Attitude and Rate Estimation” // Mathematical Problems in Engineering. – Hindawi Publishing Corporation, 2012. – Volume 2012, Article ID 170391. – 5 p.
13. Markley, F.L. Attitude Error Representations for Kalman Filtering // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 2003. – Vol. 26. – № 2. – p.p. 311 – 317.
14. Letunov, D.A. Optimizatsiya sistemy upravleniya legkogo bespilotnogo letatel'nogo apparata po chastotnomu kriteriyu: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.05 / Letunov Dmitriy Aleksandrovich. – Rybinsk, 2011. – 144 s.
15. OST 1 02514–84. Model turbulentnoy atmosfery. Kharakteristiki. – Vved. 01.01.1984. – M., 1984. – 14 s.

Mikhail Alexandrovich Lebedev
JSC "Design Bureau «Luch», Rybinsk
Engineer 1st category
Email: lebedev_oct@mail.ru

Kizimov Alex Timofeevich
VPO «Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov», Rybinsk
Ph.D., professor of "electronic and telecommunication systems"
Email: kizimovat@mail.ru

Targamadze Revaz Cholaevich
Federal State Unitary Enterprise «Scientific-Production Association named after S.A. Lavochkin», Khimki
Ph.D., Leading Specialist
E-mail: Targamadze@laspace.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 4 до 10 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.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК:

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке за статьей**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подписные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисовочной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unpk.ru.

Плата 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) 54–15–19, 55–55–24, +7(906)6639898, 41–98–48, 41–98–03

www.gu–unpk.ru
E–mail: tiostu@mail.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 Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 30.03.2014 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.
Тираж 600 экз.
Заказ №70/15П1

Отпечатано с готового оригинал–макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.