



Научный журнал
Орловского государственного
технического университета

Выходит четыре раза в год

№ 3/271(546) 2008

ИЗВЕСТИЯ ОрелГТУ

Серия «Фундаментальные и прикладные
проблемы техники и технологии»

Редакционный совет:

Голенков В.А., *председатель*
Радченко С.Ю., *зам. председателя*
Борзенков М.И.
Колчунов В.И.
Попова Л.В.
Степанов Ю.С.

Главный редактор серии:

Степанов Ю.С.

Заместители

главного редактора серии:

Гордон В.А.
Киричек А.В.
Константинов И.С.
Подмастерьев К.В.

Редколлегия:

Бабичев А.П.
Вдовин С.И.
Дмитриев А.М.
Емельянов С.Г.
Еременко В.Т.
Зубарев Ю.М.
Зубчанинов В.Г.
Иванов Б.Р.
Иванников А.Д.
Колесников К.С.
Корндорф С.Ф.
Коськин А.В.
Малинин В.Г.
Осадчий В.Я.
Панин В.Е.
Поляков А.А.
Распопов В.Я.
Смоленцев В.П.
Сотников В.В.

Ответственный за выпуск:

Константинова Г.А.

Адрес редколлегии серии:

302020, г. Орел, Наугорское шоссе,
29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Зарег. в Министерстве РФ
по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовой информации.

Свидетельство: ПИ № 77-15496 от
20 мая 2003 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса
России»

© ОрелГТУ, 2008

Содержание

Естественные науки

Варгашкин В.Я. Анализ экспериментальных ограничений на контролируемые
параметры моделей пространства событий 3

Информационные системы и технологии

Корсунов Н.И., Михелева М.В. Контроль динамических режимов шаровой
мельницы помолы с использованием нейросетевых информационных
технологий 10

Архипов О.П., Маньяков Ю.А., Сиротинин Д.О. Вычисление пространственных
координат опорных точек морфинга по плоским изображениям 18

Баранов И.Ю. Моделирование организационно-технической системы
управления РЭМС-экспертизой 24

Потапенко А.Н., Канунникова Е.А., Колтунов Л.И. Возможности
модифицированного численного метода инверсии для распределенных систем
ионизации воздуха и стержневых молниеотводов 31

Емельянова Е.А. Алгоритм обработки критической ситуации
при численном моделировании процесса иницирования вакуумного пробоя
Максаков С.А. Аналитическое моделирование процессов информационного
обмена в сетях промышленной автоматизации 39

Правдин А.Л. Методика разработки концептуальной схемы структур данных
системы технологической подготовки производства винтовых поверхностей 43

Правдин А.Л. Методика разработки концептуальной схемы структур данных
системы технологической подготовки производства винтовых поверхностей 50

Машиностроение и металлообработка

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Силантьев С.А. Контактная
выносимость после деформационного упрочнения статико-импульсной
обработки 58

Копылов Ю.Р. К проблеме восстановления внутренних поверхностей
изношенных деталей малой жесткости 62

Корячкин В.П. Реологические уравнения состояний сплошных сред 65

Осадчий В.Я., Ковалев Д.А., Тартаковский И.К., Тартаковский Б.И. Инновационные
технологии и оборудование для получения ультрамелкозернистой структуры
металла методами ОМД 70

Савин Л.А., Попиков А.А. Совершенствование условий работы опорных узлов
жидкостного трения в условиях изменения массы и дисбаланса ротора 77

Соломин О.В., Морозов А.А. Хаотические колебания роторных систем
на опорах жидкостного трения 81

Катунин А.В., Жирков А.А. Применение электродинамических пульсаторов для
стабилизации прерывистого резания 87

Приборостроение и системы управления

Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Давыдова Н.В. Разделение потерь в жидком
диэлектрике на потери от переполаризации и электронной проводимости 90

Подмастерьев К.В., Петрова О.С. Датчик температуры устройства контроля
и регулирования температуры воздуха в помещениях лечебно-
профилактических учреждений 96

Шкатов П.Н., Быданов Д.В., Бирюков А.В. Разработка тренажера на основе
виртуальных вихретоковых приборов неразрушающего контроля 101

Захаров М.Г. Разработка комплексного параметра диагностирования
трибосопряжений 106

Пахолкин Е.В., Морякин С.А., Кузьмичев Д.А. Теоретическое обоснование
частотного диапазона измерения диэлектрических потерь при контроле
состояния моторных масел диэлькометрическим методом 110

Фокин Н.Н. Нормирование и интерпретация результатов диагностирования
вязкостно-температурных свойств моторных масел электрорезистивным
методом 115

Журнал «Известия ОрелГТУ» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных ВАК, для публикации трудов на соискание ученых степеней.

<p><i>Editorial council:</i> Golenkov V.A., <i>president</i> Radchenko S.Y., <i>vice-president</i> Borzenkov M.I. Kolchunov V.I. Popova L.V. Stepanov Y.S.</p>
<p><i>Editor-in-chief</i> Stepanov Y.S.</p>
<p><i>Editor-in-chief Assistants:</i> Gordon V.A. Kirichek A.V. Konstantinov I.S. Podmasteryev K.V.</p>
<p><i>Editorial Committee</i> Babichev A.P. Vdovin S.I. Dmitriev A.M. Emelyanov S.G. Eremenko V.T. Zubarev Y.M. Subchaninov V.G. Ivanov B.R. Ivannikov A.D. Kolesnikov K.S. Korndorf S.F. Koskin A.V. Malinin V.G. Osadchy V.Ya. Panin V.E. Polyakov A.A. Raspopov V.Ya. Smolenzev V.P. Sotnikov V.V.</p>
<p><i>Responsible for edition:</i> Konstantinova G.A.</p>
<p><i>Address</i> 302020 Orel, Naugorskoye Chaussee, 29 (4862) 43-48-90, 40-96-14 www.ostu.ru E-mail: nmu@ostu.ru</p>
<p>Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-15496 from 20.05.03</p>
<p>Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504</p>
<p>© OSTU, 2008</p>

Contents

Natural Sciences

Vargashkin V.J. **The analysis of experimental restrictions on controllable parameters of models of space of events**..... 3

Information Systems and Technologies

Korsunov N.I., Mikheleva M.V. **The control of the spherical mill dynamic modes using neural networks technologies** 10

Arkhipov O.P., Manyakov Yu.A., Sirotnin D.O. **Calculation of 3-d coordinates of morphing reference points using 2-d images**..... 18

Baranov I.Yu. **The design of the technical organization control system REMS-examination**..... 24

Potapenko A.N., Kanunnikova E.A., Koltunov L.I. **The possibilities of the modified numeric inversion method for the distributed systems of air ionization and lightning rods**..... 31

Emelyanova E.A. **The algorithm of handling the critical situation at computational modeling of the vacuum breakdown initiation process**..... 39

Maksakov S.A. **Analytical modeling of the processes of the information exchange in set of the industrial automation**..... 43

Pravdin A.L. **Conceptual schem development technique for data structures of helix surfaces process design system**..... 50

Engineering

Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Silantiev S.A. **Contact endurance after deformation hardening by static impulse processing**..... 58

Kopulov Yu.R. **A problem of restoration of internal surfaces of the worn out details of small rigidity**..... 62

Koryachkin V. P. **Reologi the equations of the condition of continuous environments**..... 65

Osadchy V.Ya., Kovalev D.A., Tartakovskiy I.K., Tartakovskiy I.K. **Innovative Technology and Equipment for the Recovery of the Ultra-fine-grained Metal Structure by the Metal Forming**..... 70

Savin L.A., Popikov A.A. **Improvement functioning film bearing when mass and unbalance of rotor are changing**..... 77

Solomin O.V., Morozov A.A. **Modeling of chaotic vibration in rotor system with fluid film bearings**..... 81

Katunin A.V., Zirkov A.A. **The use of electro dynamic pulsator for interrupted cutting stabilization**..... 87

Instrument Engineering

Korndorf S.F., Nogachova T.I., Davidova N.V. **Segregation of losses in the liquid dielectric to the losses from the repolarization on the electronic**..... 90

Podmasterjev K.V., Petrova O.S. **The gauge of temperature of the device of the control and regulation of temperature of air in treatment and prophylactic establishments**..... 96

Shkatov P.N., Bydanov D.V., Byrukov A.V. **Development of the simulator on the basis of virtual eddy current devices of non destructive testing**..... 101

Zaharov M.G. **Development of complex parameter of diagnosing of working surfaces of pairs friction**..... 106

Paholkin E.V., Moryakin S.A., Kuzmichev D.A. **Theoretical justification of frequency measurement range of dielectric loss on control of motor oil state by dielcometric method**..... 110

Fokin N.N. **Normalization and interpretation of results of diagnosing of viscosity temperature properties of engine oils by electroresistiv method**..... 115

УДК 53.15

В.Я. ВАРГАШКИН

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВА СОБЫТИЙ

Показано, что имеющийся набор экспериментальных данных не противоречит попыткам переписать общую теорию относительности в кватернионном формализме. Дополнительная проверка подобной концепции возможна путем контроля частоты прецессии спутника планеты Юпитер Европы.

It is shown, that an available set of experimental data does not contradict attempts to write down the General Relativity in quaternion's formalism. Thus additional check of the similar theory is possible by the control of frequency of precession of the satellite Europe of a planet Jupiter.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе разнообразных геометрических пространств как моделей реального физического пространства-времени возникает вопрос об экспериментальной проверке согласия изучаемой геометрии с геометрией объективной реальности. Например, в работах [1 - 2] вводятся финслеровы метрические функции и определяются геодезические линии для различных классов финслеровых пространств.

Искривлению геодезической линии можно сопоставить некоторое физическое взаимодействие центрального типа, например, гравитационное. Вращение геодезической линии «как целого» (прецессия) позволяет геометризовать нецентральные взаимодействия, являющиеся следствием наличия крутящих моментов.

Характер связи геометрии с материей устанавливается с помощью систем параметров, подлежащих экспериментальному тестовому контролю. Широко распространена система параметризованных постньютоновых (ППН) параметров, современный вид которых установлен Нордтведтом [3]. Важнейшим из них является ППН-параметр γ , который служит оценкой относительной кривизны пространства-времени, создаваемой единичной массой покоя. Этот параметр, в частности, описывает отклонение геодезических линий в поле тяготения. В рамках ОТО данный параметр имеет единичное значение. Систематизируем результаты тестового контроля ППН-параметра γ и оценим допускаемую степень отклонения вновь разрабатываемых моделей пространства-времени от пространства ОТО.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ППН-ПАРАМЕТРА γ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Методика оценивания основывается на измерении параметров отклонения $\delta\varphi$ лучей звезд в поле тяготения Солнца. Возможность его наблюдения в ходе солнечных затмений предсказана А. Эйнштейном [4]. Для получения отклонения луча всего было использовано 9 затмений. Хронология и результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица снабжена также результатами перерасчетов, выполненных различными исследователями с использованием различающихся методик по данным ранее проведенных экспериментов. Пределы основной случайной погрешности оценок ППН-параметра γ , представленных в таблице 1, как правило, лежали в пределах $\pm 5...15\%$.

Таблица 1 – Хронология и результаты оценки отклонения луча оптическим методом

Дата	Оценка, “	Авторы	Примечание
29.05.19	1,98 ± 0,16 2,05 ± 0,20 1,87 ± 0,13 0,93 2,16 ± 0,14 1,61 ± 0,40	Crommelin A. Данжон Харви Дж.-М. Davidson C. Hormann J. Коттингхэм, Eddington A.S.	Собрал - 1, Бразилия; 7 звезд, Гринвич Перерасчет Перерасчет Собрал - 2, Бразилия; 11 звезд, Гринвич Перерасчет Принсипи, Африка; 5 звезд; Гринвичская обсерватория
21.09.22	1,42; 1,75; 2,16 1,72 ± 0,15 2,05 ± 0,13 2,07 2,14 ± 0,18 2,12 1,83 ± 0,20 1,82 ± 0,20 2,07 1,77 ± 0,40	Chant C.A., Young R.K. Campbell W.W. Trumpler R.J. Данжон Freundlich E.F. Hormann J. Джексон Михайлов А.А. Campbell W.W. Trumpler R.J. Данжон Davidson C.R., Dodwell G.F.	Валлол - 1, Австралия; 18 звезд Виктория Валлол - 2, Австралия; 62 - 85 звезд; Ликская обсерватория Перерасчет Перерасчет Перерасчет Перерасчет Перерасчет Валлол - 2, Австралия; 145 звезд; Ликская обсерватория Перерасчет Кордилло - Даунс, Австралия; 11 – 14 звезд; Аделаида-Гринвич
09.05.29	2,24 ± 0,10 2,04 ± 0,27 1,98 ± 0,14 1,75 ± 0,19 1,96 ± 0,11	Freundlich E.F., Brunn A., Von Kluber H.V. Данжон Джексон Trumpler R.J. Михайлов А.А.	Такенгон, Суматра; 17-18 звезд; Потсдамская обсерватория Перерасчет Перерасчет Перерасчет Перерасчет
19.06.36	2,73 ± 0,31 2,13 ± 1,15 1,28 ± 2,67	Михайлов А.А. Matukuma T., Onuki A., Yosida S., Iwana Y.	Куйбышевка, СССР; 16 - 29 звезд; ГАИШ Козимицу, Япония; 8 звезд Сандай
20.05.47	2,01 ± 0,27 2,20 ± 0,36	van Biesbroeck G. Михайлов А.А.	Бокоюва, Бразилия; 51 звезда, Перк Перерасчет
25.02.52	1,70 ± 0,10 1,82 ± 0,20 1,45	van Biesbroeck G. Михайлов А.А.	Хартум, Судан; 9 - 11 звезд Перкская обсерватория Перерасчет
02.10.59	2,17±0,35	Schmeidler F.	_____
15.02.61	1,98±0,45	Schmeidler F.	_____
30.06.73	1,66 ± 0,19	Jones B.F.	Мавритания
08.08.89 01.07.92 Опуб.1997	1,748 ± 0,003	Fröeschlé M., Mignard F., Arenou F.	Спутник ESA «Hipparcos»; 118218 звезд; Более 3500000 однократных измерений Обсерватории Пари-Медон, Франция

Таблица 2 – Хронология и результаты оценки отклонения луча радиолокационным методом

Дата;	Оценка, "	Авторы	Примечания
Ноябрь, 1966 – август, 1967	$1,58 \pm 0,35$	Shapiro I.I., Pettengill G.H., Ash M.E., Stone M.L., Smith W.B., Ingalls R.P., Brockelman R.A.	Хейстэкский радар Линкольновской лаборатории; Массачусетский технологический институт Венера и Меркурий, 3,8 см
1967 – конец 1970	$1,78 \pm 0,09$	Shapiro I.I., Ash M.E., Ingalls R.P., Smith W.B., Campbell D.B., Dyce R.B., Jurgens R.F., Pettengill G.H.	Хейстэкский радар Линкольновской лаборатории; Массачусетский технологический институт; Аресибо, Корнель, Венера и Меркурий. Двухволновое лоцирование 3,8; 70 см
Октябрь, 1969 – январь, 1971	$1,75 \pm$ $0,025$	Anderson J.D., Esposito P.B., Martin W., Thornton C.L., Muhleman D.O.	Система по исследованию дальнего космоса; НАСА «Маринер-6»; «Маринер-7»; 14 см
Опубл. 1977	$1,75 \pm 0,03$	Reasenberg R.D., Shapiro I.I., Anderson J.D., Keesley M.S.W., Lau E.L., Jr., Stundish E.M., Newhall X.X.	США; Марс и «Маринер-9» «на якоре»
Опубл. 1977	$1,75 \pm 0,01$	Shapiro I.I., Reasenberg R.D., Jr., Mac Neil P.E., Goldstein R.B., Brenclе J., Cain D.L., Komarek T., Zygielbaum A.I., Gudlihy W.F. Michael W.H., Anderson J.D., Keesley M.S.W., Laing P.A., Lau E.L.	США Марс и «Викинг» «на якоре»
Опубл. 1979	$1,751 \pm$ $0,002$	Reasenberg R.D., Shapiro I.I., Mac-Neil P.E., Goldstein R.B., Breidenthal J.C., Brenclе J.P., Cain D.L., Kaufman T.M., Komarek T.A., Zygielbaum A.I.	США Марс и «Викинг» «на якоре»
1984	$1,751$ $\pm 0,0009$	Robertson D.S., Carter W.E.	США
1991	$1,751$ $\pm 0,0009$	Robertson D.S., Carter W.E., Dillinger W.H.	США

Возможность оптических наблюдений эффекта Эйнштейна без привязки к моментам солнечных затмений была реализована в ходе высокоточных измерений координат звезд со спутника ESA «Hipparcos». Полученное таким образом значение ППН-параметра γ оказалось наиболее точным и равным $0,997 \pm 0,003$ согласно данным [80].

Дальнейшее повышение точности оценивания ППН-параметра γ связано с переходом к измерениям в радиоволновой части спектра. Впервые идея радиоизмерений была высказана И.И. Шапиро в 1964 году [5]. Существо идеи заключается в измерении релятивистской задержки времени возвращения сигнала при лоцировании космических объектов, проходящих через точку верхнего соединения с Солнцем. Искривление траектории радиолуча вызывает задержку времени его возвращения. Первоначально измерения выполнялись в ходе пассивной локации Венеры и Меркурия. Затем от пассивной

локации перешли к измерению задержки сигналов, переизлученных на Землю с космических кораблей «Маринер-6» и «Маринер-7». Наилучшие результаты достигнуты при совмещении методов пассивной и активной локации, когда сигнал, наряду с пассивной локацией Марса, подвергался также переизлучению космическими кораблями «Маринер-9» и «Викинг». В экспериментах с космическим кораблем «Викинг» «на якоре» достигнута предельно низкая погрешность, составившая $\pm 0,11 \%$. Полученные в ходе измерений радиолокационным методом результаты оценки ППН-параметра γ в пересчете на отклонение $\delta\varphi$ луча представлены в таблице 2.

Последующее повышение точности локационного метода связано с динамическими наблюдениями, когда измерению подвергается скорость изменения лоцируемого объекта при его движении в ходе соединения с Солнцем, а также применением лазерной локации.

Таблица 3 – Хронология и результаты оценки отклонения луча радиоинтерференционным методом

Дата	Оценка, "	Авторы	Примечания
30.09.69– 5.10.69	$1,77 \pm 0,20$	Seielstad G.A., Sramek R.A., Weiler K.W.	Голдстоун; Калтех – ЛРД 9,602 ГГц
02.10.69 10.10.69	$1,82^{+0,24}_{-0,17}$	Muhleman D.O., Ekers R.D., Fomalont E.B.	Оуэнс - Вэлли; Калтех 12,5 см
30.09.69 15.10.69	$1,80 \pm 0,20$	Shapiro I.I.	Голдстоун
02.10.70 – 12.10.70	$1,57 \pm 0,08$	Sramek R.A.	Национальная радиоастрономическая обсерватория США; двухволновая радиоинтерферометрия; 3,7; 11,1 см
30.09.70 – 15.10.70	$1,87 \pm 0,30$	Hill J.M.	Маллардская радиоастрономическая обсерватория; Кембридж; двухволновая радиоинтерферометрия 6,0; 11,1 см
1971	$1,70 \pm 0,14$	Sramek R.A.	США
Октябрь, 1972	$1,82 \pm 0,14$	Riley J.M.	США
1972	$1,68 \pm 0,09$	Weiler K.W., Ekers R.D., Raimond E., Wellington K.J.	США
09.10.72	$1,73 \pm 0,09$	Counselman C.C., III, Kent S.M., Knight S.A., Shapiro I.I., Clark T.A., Hinterreger H.F., Rogers A.E.E., Whitney A.R.	США
1973	$1,82 \pm 0,05$	Weiler K.W., Ekers R.D., Raimond E., Wellington K.J.	США
1974	$1,78 \pm 0,02$	Fomalont E.B., Sramek R.A.	США
1975	$1,75 \pm 0,02$	Fomalont E.B., Sramek R.A.	США
1983	$\pm 50 \%$	Turneure J. P., Will C. M., Farrell B. F., Mattison E. M., Vessot RFC	США, измерения отклонения радиоволн Юпитером

Таблица 4 – Хронология прецизионных методов измерения ППН-параметра γ

Дата	Оценка, “	Авторы	Примечание
1984	$0,9994 \pm 0,0008$	Hellings R.	По данным измерений меридианальных либраций Луны и планет путем лазерного лоцирования расстояний в системе Земля-Луна и радиолокации Меркурия, Венеры и Марса.
1995	$0,9998 \pm 0,0008$	Lebach D.E., Corey B.E., Schapiro I.I., Ratner M.I., Webber J.C., Rogers A.E.E. Davis J.L., Herring T.A.	По данным радиоинтерферометрических измерений скорости изменения временной задержки сигнала радиостанции во время соединения с Солнцем. Интерферометрия со сверхдлинной базой. Массачусетский технологический институт, Калифорния. Гарвард.
1996	$1,000 \pm 0,005$	Williams J.G., Newhall X.X., Dickey J.O.	По данным лазерного лоцирования расстояний в системе Земля-Луна и определения прецессии лунной орбиты.
2001	$1,99986 \pm 0,00028$	Eubanks T.M., Martin J.O., Archinal B.A., Josties, F.J., Klioner S.A., Shapiro S., Shapiro, I.I.	По данным интерферометрии квазаров и радиогалактик с трансконтинентальной и межконтинентальной базой.
2004	$\pm 0,00002$	V.Bertotti	Университет Павии, Болонья, Рим, Италия. Лоцирование зонда «Кассини» в окрестностях Сатурна. Радиоинтерферометрические измерения скорости изменения временной задержки и частоты сигнала.

Таблица 5 – Сравнительный анализ оценки ППН-параметра γ различными методами

Метод Измерения	№ таблицы	Количество независимых результатов	Средневзвешенная оценка
Оптический	Таблица 1	9	$1,09 \pm 0,23$
Оптический (перерасчеты)	Таблица 1	15	$1,14 \pm 0,11$
Радиолокация	Таблица 2	9	$1,00 \pm 0,04$
Радиоинтерферометрия	Таблица 3	13	$1,00 \pm 0,05$
Прецизионные методы	Таблица 4	5	$1,0006 \pm 0.0017$

Другой разновидностью радиоволнового метода оценки ППН-параметра γ является радиоинтерферометрический метод, предложенный И.И. Шапиро в 1968 году [6]. Идея метода основана на ежегодном прохождении Солнца в сентябре - октябре вблизи двух групп квазаров – 3C273; 3C279 и 3C48, а также – 0111+02; 0119+11 и 0116+08, являющихся источниками радиоизлучения. Погрешность измерения составляет при этом около $\pm 1,1$ %. Полученные в ходе измерений радиоинтерференционным методом результаты оценки ППН-параметра γ в пересчете на отклонение $\delta\varphi$ луча представлены в таблице 3.

Последующее повышение точности интерференционного метода связано с увеличением длины интерференционной базы.

Существует [7] также группа высокоточных косвенных методов измерения ППН-параметра γ , основанных на анализе либраций Луны и планет с использованием радиоволновой и лазерной локации. Использовались также измерения [8] скорости

изменения временной задержки радиосточника, квазара, радиогалактики, либо искусственного аппарата, входящего в верхнее соединение с Солнцем, которые были выполнены по методу интерферометрии со сверхдлинными, суб- и межконтинентальными базами. Результаты измерений представлены в таблице 4. Минимальная оценки ППН-параметра γ была достигнута в ходе лоцирования зонда «Кассини» в окрестностях Сатурна и составила $\pm 2 \times 10^{-5}$.

КОНТРОЛЬ ПРЕЦЕССИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЛИНИЙ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА СОБЫТИЙ

Таким образом, для проверки альтернативных гравитационных гипотез наиболее подходящим может явиться теоретический анализ и количественные измерения прецессий геодезических как целого, вызываемых, например, отклонением формы гравитационного поля от сферически симметричной формы. В указанном контексте наиболее показательной является работа А.П. Ефремова [9], где автор утверждает соответствие геодезического движения в рамках анализируемой им геометрии кватернионных чисел соответствующим выводам теории относительности. Однако разрабатываемая им теория позволяет предсказать дополнительные к теории относительности прецессии, в частности, наблюдаемую с Земли прецессию орбит спутников планет, частота которой вычисляется по формуле:

$$\Omega = \omega_S \frac{v_E v_P}{c^2},$$

где v_E – скорость орбитального движения Земли; v_P – скорость орбитального движения планеты; ω_S – частота орбитального вращения спутника. Автором предложена также модель эксперимента по наблюдению данной прецессии у спутника Марса Фобоса и спутника Юпитера Ио, которые должны достигать соответственно 20 и 12 угловых минут за сто лет.

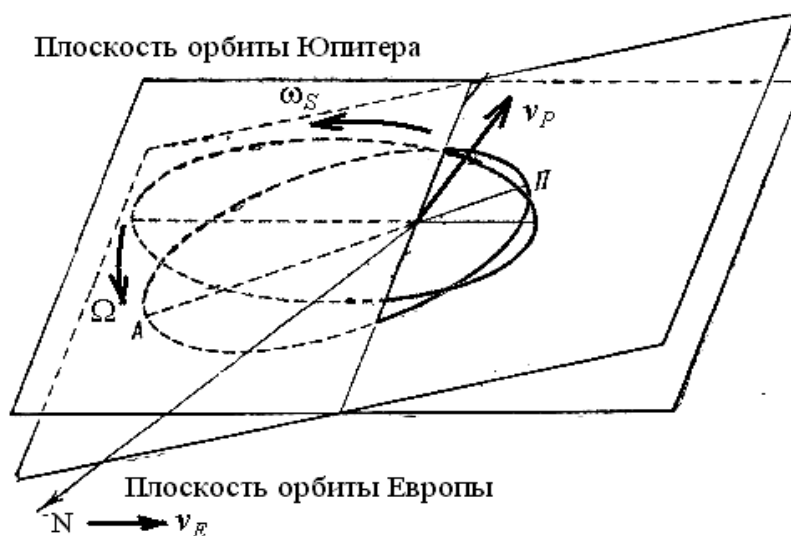


Рисунок 1 – Прецессия орбиты Европы в пространстве-времени, наделенном финслеровой геометрией

Следует обратить внимание на то, что наивысшая точность определения координат положения спутников планет была достигнута спутником ESA Hipparcos [10] в ходе почти трехлетних наблюдений спутника Юпитера Европа (рисунок 1). Вековое смещение орбиты Европы согласно приведенной формуле должно составлять 7,5 угловых минут. В ходе спутниковых наблюдений это смещение должно было составить 13 угловых секунд.

Видимый угловой радиус орбиты Европы составляет около трех угловых минут. Измерения небесных координат, выполненные со спутника, характеризовались погрешностью порядка десятка угловых миллисекунд. Следовательно, точные измерения параметров видимого обращения Европы вокруг Юпитера, несмотря на достаточно малый,

порядка 0,0001, эксцентриситет ее орбиты, могут позволить установить элементы невозмущенной орбиты.

При этом обнаружение теоретически предсказанной А.П. Ефремовым прецессии этой орбиты, а также количественное соответствие частоты этой прецессии расчетной величине Ω могут служить аргументом в пользу финслеровости пространства событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов систематизации и анализа экспериментальных оценок значения ППН-параметра γ показано, что результаты геометризации пространства событий в части геодезического движения в слабом гравитационном поле могут отличаться от предсказаний теории относительности по рассмотренному параметру не более чем на $10^{-2} \dots 10^{-3} \%$. В рамках достигнутой точности физических экспериментов не обнаружено каких-либо признаков систематического отличия геодезического движения частиц от предсказаний ОТО. Сделан вывод о том, что в подобных условиях экспериментальные тесты концепций геометризации могут опираться на измерения прецессий геодезических линий.

Сформулирована задача непосредственного экспериментального тестирования кватернионной теории относительности по параметрам прецессионного вращения орбиты спутника Юпитера Европы с использованием результатов прецизионных астрометрических измерений спутником ESA «Hipparcos».

ЛИТЕРАТУРА

1. Асанов, Г.С. Финслероид-пространство, снабженное углом и скалярным произведением [Текст] / Г.С. Асанов // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2004. № 1(1). С. 41–65.
2. Гарасько, Г.И. Обобщенно-аналитические функции поличисловой переменной [Текст] / Г.И. Гарасько // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2004. № 1(1). С. 77–90.
3. Nordvedt K. // Phys. Rev. 1968. Vol. 169. P. 1017; 1969. Vol. 180. P. 1293.
4. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // Ann. Phys. 1911. Bd. 35. SS. 898 – 908.
5. Shapiro I.I. Fourth test of General Relativity // Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. PP. 789 – 791.
6. Shapiro I.I. // Science.–1968. Vol. 162. P. 352.
7. Hellings R. // General Relativity and Gravitational.–Eds. B. Bertotti, F. De Felis and A.Pascolini, 1985. Vol. 365.
8. Lebach D.E., Corey B.E., Schapiro I.I., Ratner M.I., Webber J.C., Rogers A.E.E., Davis J.L., Herring T.A. // Phys. Rev. Letters. 1995. Vol. 75. P. 1439.
9. Ефремов, А.П. Кватернионы: Алгебра, геометрия и физические теории [Текст] / А.П. Ефремов // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2004. № 1(1). С. 112–124.
10. The Hipparcos and Tycho Catalogues: Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission. A Collaboration Between the European Space Agency and the FAST, NDAC, TDAC and INCA Consortia and the Hipparcos Industrial Consortium led by Matra Marconi Space and Alenia Spazio.- European Space Agency, SP 1200.-June 1997.

Варгашкин Владимир Яковлевич

Институт физики, Лондон, Великобритания
 Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика»
 Тел.: (4862) 41-98-89



УДК 681.3.06

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Н.И. КОРСУНОВ, М.В. МИХЕЛЕВА

КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПОМОЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассматривается метод, основанный на анализе таксономического показателя для контроля динамических режимов мельницы с использованием нейросетевых технологий. В основе метода лежит создание и обучение рекуррентной нейронной сети. Обученная нейронная сеть позволяет осуществлять более качественный контроль динамических режимов мельницы, базирующийся на результатах исследования динамики. Приводятся теоретические положения таксономической классификации динамических режимов объектов управления.

A method, based on the analysis of taxonomical index for control of the dynamic modes of mill with the use of neural networks technologies, is examined in the article. In a basis of a method is creation and teaching of recurrent neuron network. The trained neuron network allows to carry out more high-quality control of the dynamic modes of mill, being based on the results of research of dynamics. Theoretical positions over of taxonomical classification of the dynamic modes are brought.

Для управления процессом измельчения сухих строительных смесей с помощью мельницы необходим контроль динамических режимов мельницы. Качественный динамический контроль измельчения исходного сырья и получение смеси в соответствии с рецептурой позволит оперативно оценивать динамические показатели мельницы и принимать решение об управлении процессом.

Оперативный контроль всех показателей человеком практически невозможен даже при визуальном отображении информации, для анализа которой требуется не только высокая квалификация специалиста, но и обработка данных.

Для устранения недостатков предлагается использовать нейросетевые технологии, основанные на анализе по таксономическому показателю.

Предлагается использовать новый подход, основанный на анализе таксономического показателя. Этот показатель является интегральной величиной, учитывающей все множество измеряемых параметров или переменных, и используется для процедур классификации в современных социально-экономических и технических системах [1].

Для определения таксономического показателя используется матрица наблюдений $X(t)$, имеющая n столбцов и m строк. Каждый из столбцов матрицы соответствует одной из измеряемых величин $x_1, \dots, x_p, x_{p+1}, \dots, x_n$. Число m строк матрицы соответствует числу тактов измерений контролируемых величин:

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \dots & x_p(t_1) & \tilde{x}_{p+1}(t_1) & \dots & \tilde{x}_n(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \dots & x_p(t_2) & \tilde{x}_{p+1}(t_2) & \dots & \tilde{x}_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_i) & x_2(t_i) & \dots & x_p(t_i) & \tilde{x}_{p+1}(t_i) & \dots & \tilde{x}_n(t_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_m) & x_2(t_m) & \dots & x_p(t_m) & \tilde{x}_{p+1}(t_m) & \dots & \tilde{x}_n(t_m) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Все измеряемые величины $x_1(t), \dots, x_n(t)$ матрицы $X(t)$ могут делиться на две группы: показатели-стимуляторы ($\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_p$) и показатели - дестимуляторы ($\check{x}_1, \dots, \check{x}_p$). Увеличение показателей первой группы в общем случае ведет к улучшению состояния объекта, а второй группы – к его ухудшению.

Поскольку наблюдаемые параметры или переменные по величине могут отличаться на порядки, то исходная матрица наблюдений $X(t)$ преобразуется к стандартизованной матрице наблюдений $Z(t) = \|z_{ji}(t_j)\|$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$. Для определения элементов матрицы $Z(t)$ предварительно рассчитывают оценки математических ожиданий и дисперсий для каждого из наблюдаемых показателей.

$$\bar{x}_i(t_m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_i(t_j), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sigma_i^2(t_m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_i(t_j) - \bar{x}_i)^2, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Затем, используя выражения (2) и (3), рассчитывают элементы z_{ij} матрицы $Z(t)$:

$$z_{ij} = z_{ij}(t) = \frac{x_i(t_j) - \bar{x}_i}{\sigma_i}. \quad (4)$$

Исходная матрица наблюдений $X(t)$ и соответствующая ей стандартизованная матрица наблюдений $Z(t)$ могут соответствовать развитию во времени или одного из множества объектов, или одного из возможных сценариев поведения единственного объекта. Очевидно, что в обоих случаях их можно рассматривать как точки в $(n \times m)$ -мерном пространстве возможных матриц, в котором можно определить и точку, соответствующую эталонной матрице наблюдений $Z^*(t)$:

$$\begin{cases} Z^*(t) = \|z_{ji}^*\| = |z_1^*(t), \dots, z_n^*(t)|, & j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}, \\ \hat{z}_i^*(t_j) = \max_j \hat{z}_i^*(t_j) & j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, p}, \\ \check{z}_q^*(t_j) = \min_j \check{z}_q^*(t_j) & j = \overline{1, m}, \quad q = \overline{p+1, n}, \end{cases} \quad (5)$$

где $Z_i^*(t) = |z_i^*(t_1), \dots, z_i^*(t_m)|$, $i = \overline{1, n}$ – столбцы матрицы $Z^*(t)$; $\hat{z}_i^*(t_j)$, $i = \overline{1, p}$ – максимальные элементы столбцов матрицы $Z^*(t)$, содержащих данные по показателям-стимуляторам; $\check{z}_q^*(t_j)$, $q = \overline{p+1, n}$ – минимальные элементы столбцов матрицы $Z^*(t)$, содержащих данные по показателям - дестимуляторам; p , $n-p$ – соответственно число показателей - стимуляторов и показателей - дестимуляторов, характеризующих объект.

Близость матриц $Z(t)$ и $Z^*(t)$ соответственно наблюдаемого и эталонного объектов можно охарактеризовать с помощью расстояний

$$r(t_j) = \left(\sum_{i=1}^n (z_i(t_j) - z_i^*(t_j))^2 \right)^{1/2}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\bar{r}(t_m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r(t_j), \quad (7)$$

где $r(t_j)$ – расстояние между наблюдаемым и эталонным объектом в момент времени t_j , ($j = \overline{1, m}$); $\bar{r}(t)$ – среднее расстояние между наблюдаемыми и эталонными объектами в интервале времени $[t_1, t_m]$.

Расстояния (6), (7) используются для определения таксономического показателя объекта

$$d(t_j) = 1 - \frac{r(t_j)}{\bar{r}(t)}, \quad (8)$$

где

$$\tilde{r}(t) = \bar{r}(t) + 2S(t), \tilde{r}(t) \neq 0, \quad (9)$$

$$S(t_m) = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (r(t_j) - \bar{r}(t))^2 \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Чем меньше расстояния (6), (7), тем ближе наблюдаемый объект к эталонному и тем ближе к единице таксономический показатель объекта $d(t_j)$. Уменьшение показателя $d(t_j)$ может свидетельствовать об отклонении динамики наблюдаемого объекта от оптимальной и необходимости соответствующих управляющих воздействий на наблюдаемый объект.

Непосредственное использование соотношений (5) – (10) для постоянного контроля динамики объектов в реальном времени громоздко, поскольку требует работы с матрицами наблюдений с изменяющимся числом строк и запоминанием больших объемов информации. Рациональнее использовать расчет соотношений (5) – (10) в рекуррентной форме.

Для контроля динамических режимов с помощью таксономического показателя используем нейронную рекуррентную сеть [2-3]. Для реализации соотношений (5) – (10) в рекуррентной форме необходимо использовать рекуррентные сети, которые представляют собой развитие однонаправленных сетей перцептронного типа за счет добавления в них элементов единичной задержки сигналов и обратных связей. Примером наиболее простой рекуррентной сети является сеть RMLP (Reccurent MultiLayer Percerptron – рекуррентный многослойный перцептрон). Эта сеть может иметь много входных и выходных сигналов и скрытых слоев нейронов. Другим примером рекуррентной нейронной сети является RTRN (Real Time Reccurent Network), изображенная на рисунке 1.

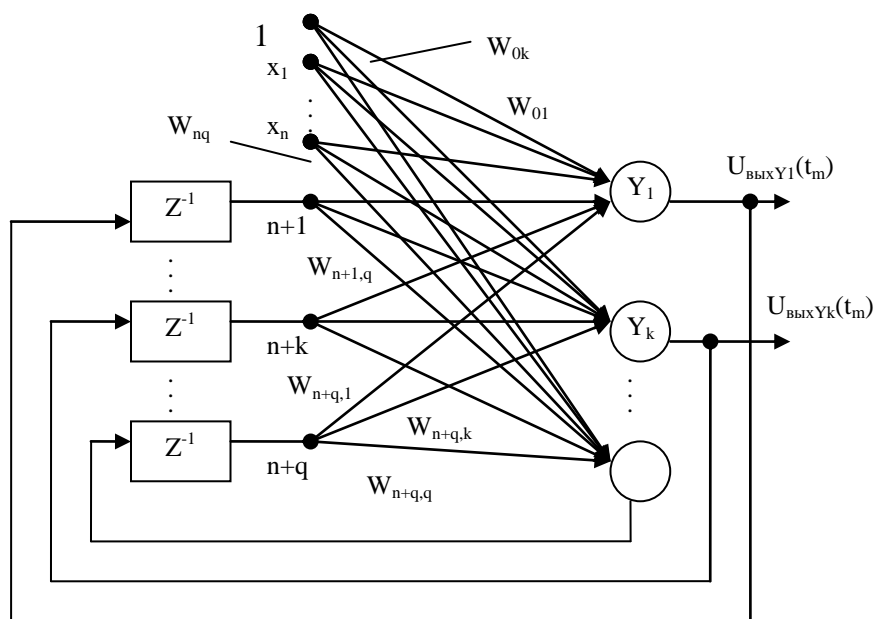


Рисунок 1 – Структура рекуррентной нейронной сети RTRN

Сеть имеет n входных узлов и q Y -нейронов, k из которых являются и выходными нейронами сети. Расширенный выходной вектор сети $x(t)$ в момент времени $t = tm$ имеет вид:

$$x(t_m) = (1, x_1(t_m), \dots, x_n(t_m), U_{\text{вых}Y_1}(t_{m-1}), \dots, U_{\text{вых}Y_q}(t_{m-1})), \quad (11)$$

где $U_{\text{вых}Y_i}(t_{m-1})$, $i = \overline{1, q}$ – выходные сигналы $U_{\text{вых}Y_i}(t_m)$ нейронов Y_i , задержанные элементами единичных задержек.

Вектор $x(t_m)$ определяет состояние Y -нейронов сети в момент времени t_m :

$$U_{\text{ex}Y_i}(t_m) = \sum_{p=0}^{n+q} W_{pi} x_p(t_m), i = \overline{1, q}, \quad (12)$$

$$U_{\text{вых}Y_i}(t_m) = f_i(U_{\text{ex}Y_i}(t_m)), \quad (13)$$

где $U_{\text{вых}Y_i}(t_m)$, $U_{\text{ex}Y_i}(t_m)$ – выходной и входной сигнал i -го ($i = \overline{1, q}$) Y -нейрона; W_{0i} ($i = \overline{1, q}$) – веса связей для сигнала смещения Y -нейронов; W_{pi} ($p = \overline{1, n+q}$, $i = \overline{1, q}$) –

веса связей между слоем входных узлов сети и слоем Y-нейронов; f_i ($i = \overline{1, q}$) – сигмоидальные функции активации Y-нейронов.

Рассмотрим частный случай этой сети, когда $k = q = n$ и соотношение (12) принимает вид [4]:

$$U_{\alpha Y_i}(t_m) = W_{ii}x_i(t_m) + W_{n+i}U_{\text{вых}Y_i}(t_{m-1}), \quad (14)$$

т.е. когда каждый Y-нейрон имеет только два входа. На один вход нейрона Y_i поступает входной сигнал $x_i(t_m)$, а на второй – выходной сигнал этого же нейрона, но задержанный на один такт времени элементом единичной задержки. Этот частный случай сети RTRN фактически и используется в качестве нейронной сети для контроля динамических режимов шаровой мельницы помола с помощью таксономического показателя.

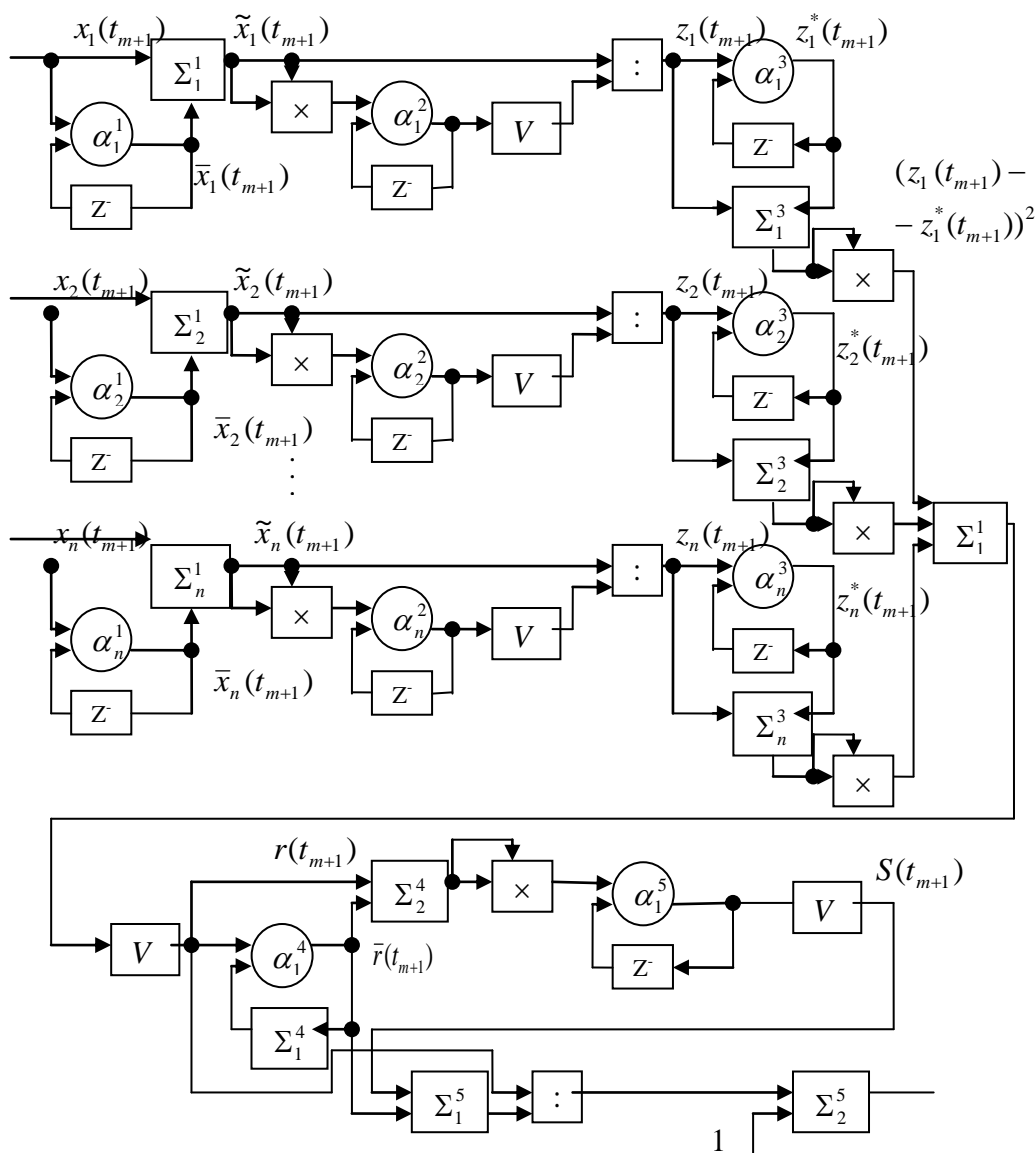


Рисунок 2 – Нейронная сеть для вычисления таксономического показателя

Структура нейронной сети приведена на рисунке 2, где приняты следующие обозначения:

- j-й нейрон i-го слоя с линейной функцией активации, выполняющий взвешенное алгебраическое суммирование входных сигналов;
- блок, реализующий оператор временного единичного сдвига входного сигнала;
- соответственно блок суммирования, умножения, извлечения квадратного корня и деления.

С помощью нейронов $\alpha_1^1, \alpha_2^1, \dots, \alpha_n^1$ первого слоя, каждый из которых в цепи обратной связи имеет блок, реализующий оператор единичного временного сдвига Z^{-1} , осуществляется определение оценок средних значений.

$$\text{Поскольку } \bar{x}_i(t_{m+1}) = \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^{m+1} x_i(t_j) = \frac{m}{m+1} \bar{x}_i(t_m) + \frac{1}{m+1} x_i(t_{m+1}),$$

то входные сигналы нейронов $x_i(t_{m+1})$, $i = \overline{1, n}$ умножаются на весовой коэффициент $1/(m+1)$, а сигналы обратной связи $\bar{x}_i(t_m)$, $i = \overline{1, n}$ – на весовой коэффициент $1 - \frac{1}{m+1} = \frac{m}{m+1}$. В связи

с этим на выходах нейронов первого слоя $\alpha_1^1, \alpha_2^1, \dots, \alpha_n^1$ соответственно получают сигналы $\bar{x}_1(t_{m+1}), \bar{x}_2(t_{m+1}), \dots, \bar{x}_n(t_{m+1})$, которые с помощью сумматоров $\Sigma_1^1, \Sigma_2^1, \dots, \Sigma_n^1$ и входных сигналов $x_1(t_{m+1}), x_2(t_{m+1}), \dots, x_n(t_{m+1})$ позволяют получать разности

$$\tilde{x}_i(t_{m+1}) = x_i(t_{m+1}) - \bar{x}_i(t_{m+1}), \quad i = \overline{1, n}. \quad (15)$$

С помощью нейронов второго слоя $\alpha_1^2, \alpha_2^2, \dots, \alpha_n^2$, каждый из которых на одном из входов имеет блок умножения для получения квадрата разности отклонения текущего входного сигнала $x_i(t_{m+1})$ от оценки его среднего значения $\bar{x}_i(t_{m+1})$: $(x_i(t_{m+1}) - \bar{x}_i(t_{m+1}))^2$, а в цепи обратной связи – блок, реализующий оператор единичного временного сдвига, в соответствии с рекуррентными соотношениями вычисляются оценки дисперсии $\sigma_1^1(t_{m+1}), \sigma_2^1(t_{m+1}), \dots, \sigma_n^1(t_{m+1})$:

$$\sigma_i^2(t_{m+1}) = \frac{m}{m+1} \sigma_i^2(t_m) + \frac{1}{m+1} (x_i(t_{m+1}) - \bar{x}_i(t_{m+1}))^2.$$

Элементы $z_{m+1,1}, z_{m+1,2}, \dots, z_{m+1,n}$ последней $(m+1)$ -й строки стандартизованной матрицы наблюдений $Z(t)$ рассчитываются с помощью блоков извлечения квадратного корня (определяются $(\sigma_1^1(t_{m+1}), \sigma_2^1(t_{m+1}), \dots, \sigma_n^1(t_{m+1}))$) и блоков деления, вычисляющих отношения $\frac{\tilde{x}_i(t_{m+1})}{\sigma_i(t_{m+1})}$ $i = \overline{1, n}$.

В третьем слое нейроны $\alpha_1^3, \alpha_2^3, \dots, \alpha_n^3$ уточняют максимальные значения $z_1^*(t_{m+1}), \dots, z_p^*(t_{m+1})$ для показателей - стимуляторов объекта и минимальные значения $\tilde{z}_{p+1}^*(t_{m+1}), \dots, \tilde{z}_n^*(t_{m+1})$ для показателей - дестимуляторов, т.е. уточняют эталонные значения, если эталонный объект заранее не задан. Если эталонный объект задан, то нейроны $\alpha_1^3, \alpha_2^3, \dots, \alpha_n^3$ не нужны, а соответствующие входы сумматоров $\Sigma_1^3, \Sigma_2^3, \dots, \Sigma_n^3$ и последовательно соединенных с ними блоков умножения рассчитываются как квадраты разностей

$$(z_i(t_{m+1}) - z_i^*(t_{m+1}))^2, \quad i = \overline{1, n},$$

которые затем с помощью сумматора Σ_1^4 , имеющего n входов, и следующего за ним блока извлечения квадратного корня используют для вычисления расстояния между эталонным и наблюдаемым объектами в момент времени t_{m+1} :

$$r(t_{m+1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i(t_{m+1}) - z_i^*(t_{m+1}))^2}.$$

Единственный нейрон α_1^4 четвертого слоя вычисляет расстояние $\bar{r}(t_{m+1})$. Текущее значение таксономического показателя $d(t_{m+1})$ рассчитывается с помощью блока деления на выходе сумматора Σ_1^5 и сумматора Σ_2^4 .

В процессе эксплуатации объекта нейронная сеть рассчитывает последовательность значений таксономического показателя $\alpha(t_1), \alpha(t_2), \dots, \alpha(t_m), \alpha(t_{m+1}), \dots$. Если получаемые

$$\Delta_i(t_k) = y(t_k) - y_i(t_k), \quad i = \overline{1, d}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Разности (19) с помощью нейронов третьего слоя $A_1^3, A_2^3, \dots, A_d^3$, каждый из которых имеет на одном из входов блок умножения, а в цепи обратной связи блок с единичной задержкой сигнала, используются для подсчета суммы (20) – квадратов евклидовых расстояний между входными сигналами и прогнозируемыми:

$$\Sigma_i(t_k) = \sum_{j=1}^k (y(t_j) - y_i(t_j))^2 = \sum_{j=1}^k (\Delta_i y(t_j))^2, \quad i = \overline{1, d}. \quad (20)$$

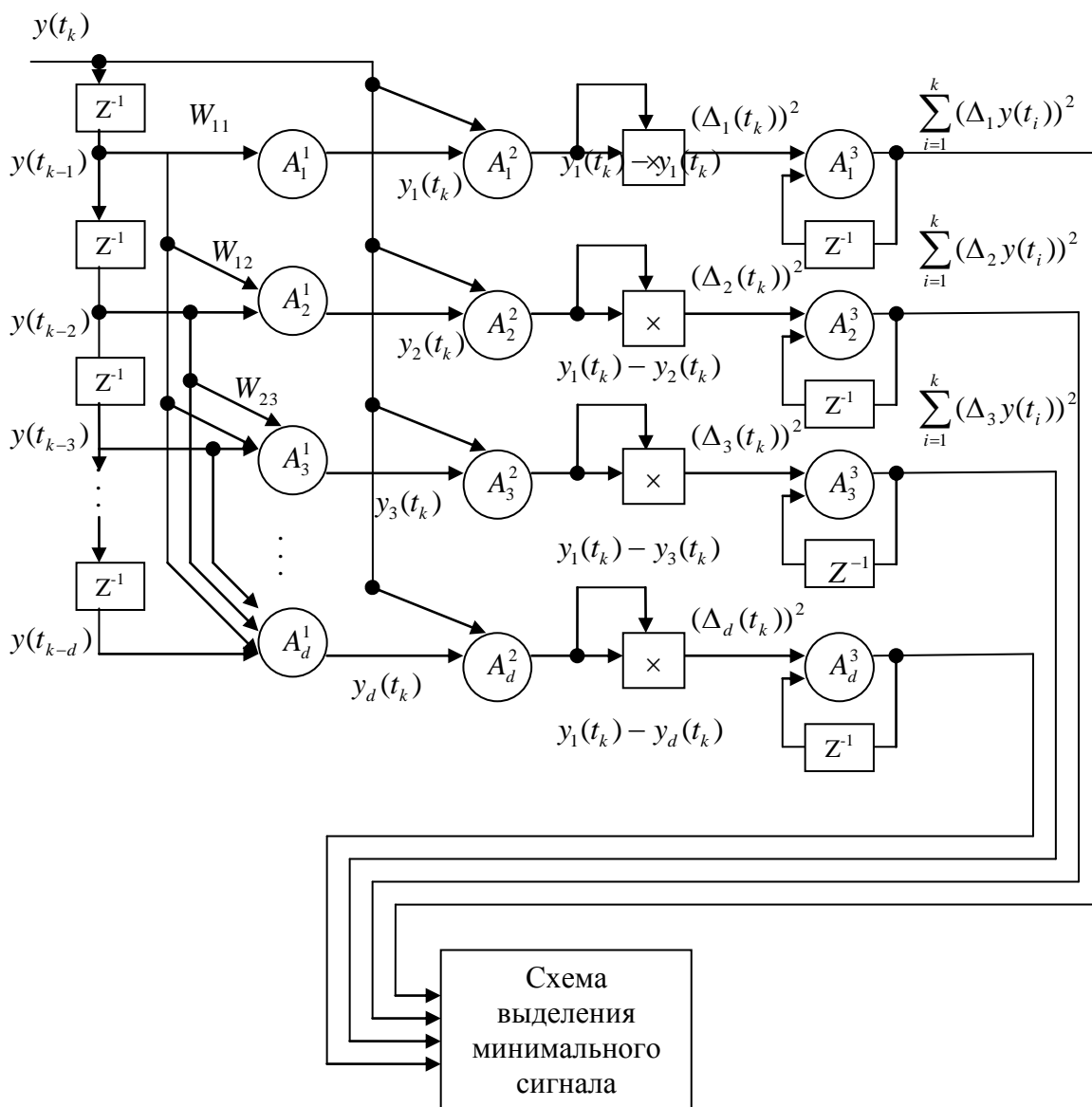


Рисунок 3 – Контролирующая нейронная сеть с прямой передачей сигналов для линейных стохастических объектов

Лучшая из моделей (18) имеет минимальную сумму (20) и может быть использована для описания измеряемой выходной последовательности (17).

Таким образом, предлагаемый метод, основанный на использовании таксономического показателя, при обучении нейронной сети позволяет осуществлять более качественный контроль, базирующийся на результатах исследования динамики, а не на экспертных знаниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородянский, Е.В. Об одном алгоритме таксономической классификации на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / Е.В. Бородянский, Л.М. Любчик, Г.А. Матусовский, И.П. Плис // Радиозлектроника и информатика. 1998. №3. С.65–68.
2. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / С. Оссовский; пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
3. Кричевский, М.Л. Введение в искусственные нейронные сети [Текст] / М.Л. Кричевский – СПб.: Изд. СПб Гос. морск. техн. унив., 1999.
4. Носков, В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов [Текст] / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов // Научное издание – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. С. 219–222.

Корсунов Николай Иванович

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
Доктор технических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники
и автоматизированных систем
Тел.: + 8(4722)54-98-53

Михелева Мария Владимировна

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
Аспирант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.
Тел.: 8-961-173-94-05
E-mail: mikheleva_mv@mail.ru

О.П. АРХИПОВ, Ю.А. МАНЬЯКОВ, Д.О. СИРОТИНИН

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОПОРНЫХ ТОЧЕК МОРФИНГА ПО ПЛОСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В статье описывается метод получения 3D координат опорных точек, используемых для регистрации морфинга, по фотографиям. Метод основан на модели камеры-обскуры. Данный метод позволяет без больших временных и материальных затрат преобразовывать двумерные координаты в трехмерные.

The article describes the method of obtaining 3D coordinates of reference points out of photographs, which are used for morphing registration. The method is based on the pinhole camera model. This method allows quickly to convert 2D coordinates to 3D using only simple and cheap devices (like digital camera) and software.

В настоящее время в связи с ростом популярности мультимедийных ресурсов весьма актуальна проблема реализации простой и эффективной технологии создания анимации трехмерных объектов. Подобные технологии находят применение в сфере образования, используются в средствах массовой информации, а также в качестве дополнения к системам поддержки принятия решений. Одним из приоритетных направлений трехмерной анимации является морфинг.

Морфинг – преобразование формы или объекта в другую форму или объект с использованием компьютерной анимации [1]. При морфинге создаются лишь опорные фигуры, а также иногда задаются опорные точки, которые помогают корректно его произвести.

Для регистрации морфинга необходимо проследить изменение положения особых опорных точек объекта. В данном случае под опорной точкой понимается точка, представляющая определенную совокупность получаемых после структурирования объекта элементов (точек, объемов) и определяющая их поведение при морфинге. Координаты этих опорных точек вычисляются, фиксируются и впоследствии, по изменению их положения в пространстве, можно судить об изменении формы всего объекта.

Сегодня существуют такие методы получения трехмерных координат:

- лазерное сканирование;
- синтез 3D модели по двумерным изображениям.

Суть технологии лазерного сканирования заключается в определении пространственных координат точек поверхности объекта. Это реализуется посредством измерения расстояния до всех определяемых точек с помощью лазерного безотражательного дальномера. При каждом измерении луч дальномера отклоняется от своего предыдущего положения так, чтобы пройти через узел некоей мнимой нормальной сетки, называемой еще сканирующей матрицей. Количество строк и столбцов матрицы может регулироваться. Чем выше плотность точек матрицы, тем выше плотность точек на поверхности объекта [2,3].

Преимуществами технологии являются измерения, которые производятся с очень высокой скоростью – тысячи, а порой и десятки тысяч измерений в секунду, недостатками – крайне дорогостоящее оборудование и программное обеспечение.

Синтез 3D модели по двумерным изображениям основан на аналитической обработке исходных данных в соответствии с математической моделью нахождения трехмерных координат точек по их двумерным, замеренным на двух смещенных отображениях. Вычисления основаны на определении смещения положения каждой точки на смежных фотографиях для определения трехмерных ее координат, нахождения для каждой позиции камеры трехмерных координат, определения взаимной ориентации фотографий [4].

Данный метод довольно прост в реализации, позволяет быстро получать трехмерные координаты точек по фотографиям, не предъявляет высоких требований к квалификации пользователя, аппаратному и программному обеспечению. К недостаткам можно отнести невысокую точность результатов.

Таким образом, данный метод наиболее соответствует цели, которой является ускорение и упрощение процесса морфинга, посредством получения 3D координат опорных точек.

Для восстановления трехмерных координат объекта по изображению с нескольких камер используется модель камеры-обскуры (pinhole camera) [5].

Камера-обскура представляет собой светонепроницаемый ящик (рисунок 1), в центре одной из стенок которого «проколото» маленькое отверстие (в идеале это должна быть геометрическая точка, имеющая бесконечно малый размер, отсюда и название этого прибора на английском языке - pinhole camera, т.е. камера с отверстием, проколотым иглой). На внутренней стороне противоположной стенки ящика закреплена фоточувствительная пластина. Камера имеет единственный внутренний параметр – фокусное расстояние f , это расстояние от отверстия до противоположной стенки ящика.

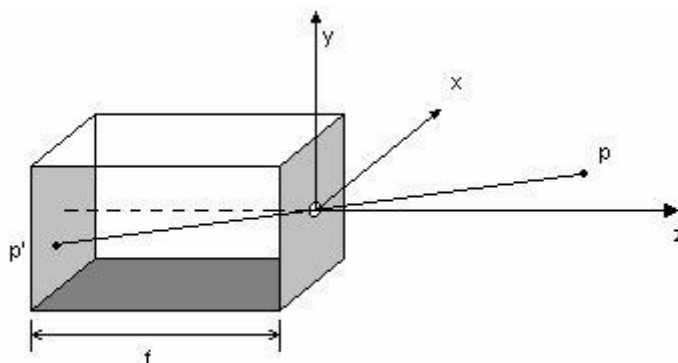


Рисунок 1 – Камера-обскура

При моделировании камеры-обскуры светонепроницаемый ящик заменяют системой «точка наблюдения – плоскость изображения» (рисунок 2).

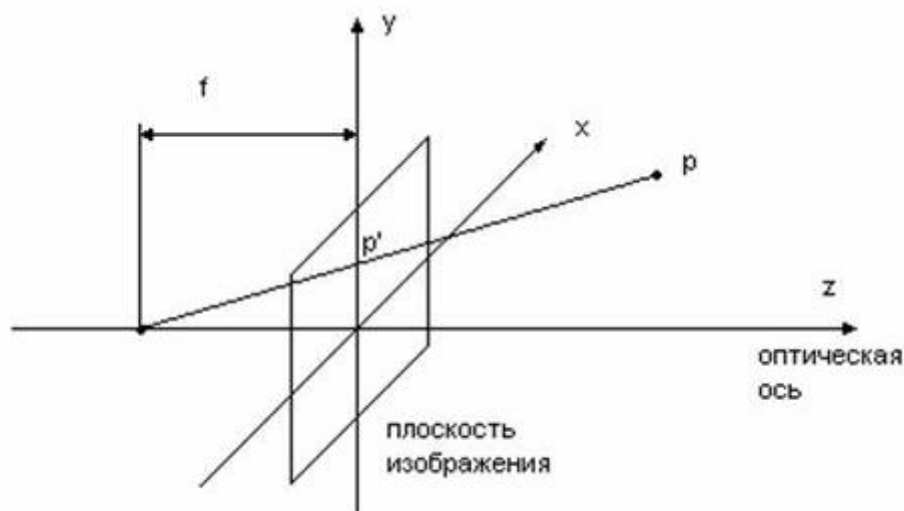


Рисунок 2 – Система «точка наблюдения – плоскость изображения»

Маркеры позволяют жестко задать систему координат и используются для корректного определения координат камер и опорных точек объекта. Маркеры образуют специальную инициализационную фигуру (рисунок 3), которая будет всегда находиться в кадре во время съемки.

$$l = \frac{(f \cdot h)}{S_y \cdot (y_2 - y_1)}. \quad (3)$$

Аналогично находятся расстояния C_1M_2 , C_2M_1 , C_2M_2 (рисунки 3, 4 и 5).
 Расстояния C_1N_1 и C_2N_1 находятся из соотношений:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h}, \quad (4)$$

$$C_1N_1 = \frac{l}{\sin \alpha}. \quad (5)$$

Отсюда:

$$C_1N_1 = \frac{l}{\sin\left(\operatorname{arctg} \frac{l}{h}\right)}. \quad (6)$$

Далее необходимо определить координаты камер. Учитывая, что расстояния до маркеров известны, можно утверждать, что:

$$\begin{cases} C_1N_1^2 = x^2 + (y-h)^2 + z^2 \\ C_1M_2^2 = (x-w)^2 + (y-h)^2 + z^2 \\ C_1N_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \end{cases} \quad (7)$$

Аналогично для C_2M_1 , C_2M_2 , C_2N_1 .

Решая системы уравнений, находим координаты точек C_1 и C_2 .

Далее находим расстояние до опорной точки (z -координату), т.е. длину отрезка X_1A (рисунок 5).

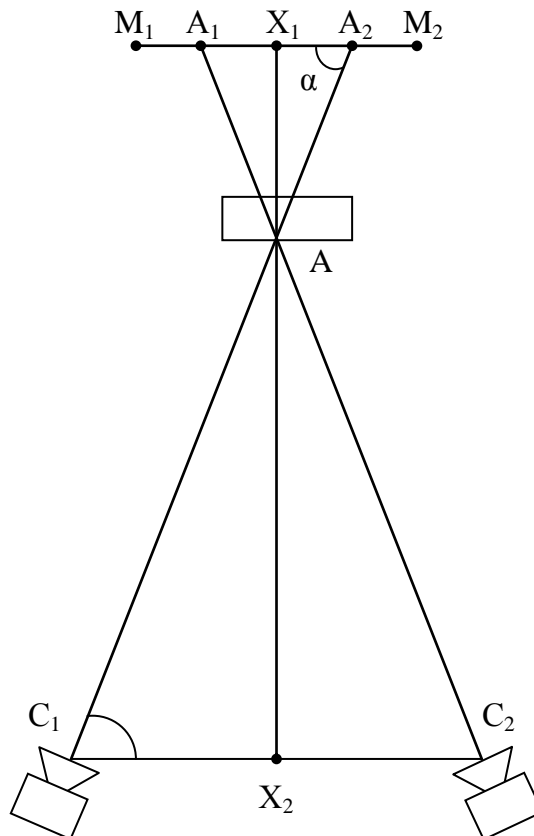


Рисунок 5 – Определение расстояния до опорной точки

Далее необходимо найти координату z каждой опорной точки, которая по сути является расстоянием от маркерной фигуры до опорной точки.

Для вычисления координаты z необходимо:

1. Найти по двум снимкам усредненную длину отрезка M_1M_2 в пикселах:

$$w'_{cp} = \frac{(x_{M_2}^{C_1} - x_{M_1}^{C_1}) + (x_{M_2}^{C_2} - x_{M_1}^{C_2})}{2}, \quad (8)$$

где $x_{M_1}^{C_1}, x_{M_1}^{C_2}, x_{M_2}^{C_1}, x_{M_2}^{C_2}$ – координаты x маркеров M_1 и M_2 , соответственно, на фотографиях, снятых с камер с позиций C_1 и C_2 , соответственно.

2. Найти соотношение длины в пикселах и в линейных единицах (r):

$$r = \frac{w}{w'_{cp}}, \quad (9)$$

где w – длина отрезка M_1M_2 в линейных единицах.

3. Найти длину M_1A_1 (в пикселах) по второй фотографии (C_2).
4. Найти длину M_2A_2 (в пикселах) по первой фотографии (C_1).
5. Найти длину отрезка A_1A_2 :

$$A_1A_2 = w - (A_2M_2 + A_1M_1) \cdot r. \quad (10)$$

6. Коэффициент подобия треугольников C_1AC_2 и A_2AA_1 равен:

$$k = \frac{C_1X_2}{X_1A_2}. \quad (11)$$

Учитывая, что:

$$X_1X_2 = X_1A + X_2A, \quad (12)$$

тогда:

$$C_1X_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha + A_2X_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha = X_1X_2, \quad (13)$$

или

$$k \cdot X_1A_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + A_2X_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha = X_1X_2. \quad (14)$$

Отсюда

$$AX_1 = \frac{X_1X_2}{(k+1)}. \quad (15)$$

Длина отрезка AX_1 является искомой координатой z опорной точки.

Далее необходимо найти координаты x и y опорной точки.

Если в соотношении (1) рассматривать h , как искомое расстояние от начала координат (маркера) до опорной точки в пространстве, а p – как расстояние от начала координат (маркера) до опорной точки в плоскости изображения, получим:

$$h = \frac{l \cdot p}{f}. \quad (16)$$

Вычисляя по фотографии p по оси x и по оси y , получим соответственно координаты x и y опорной точки в пространстве.

Таким образом, описанный метод позволяет сравнительно быстро и без использования дорогостоящего оборудования и программных средств осуществить преобразование двумерных координат точек на фотоснимках в трехмерные координаты

опорных точек модели. Эти точки позволяют отследить преобразования объекта во время морфинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воройский, Ф. С. Новый систематизированный толковый словарь-справочник [Текст] / Ф.С. Воройский // Издание третье, переработанное и дополненное. – М.: Физматлит, 2003. С. 457–458.
2. Что такое лазерное сканирование? [Электронный ресурс], Навгеоком 2004 – режим доступа: http://www.navgeocom.ru/scan/technology/3dl_exp/index.htm.
3. Борисенко, Борис. 3D-сканирование в интересах 3D-моделирования [Текст] / Борис Борисенко, Сергей Ярошенко // КомпьютерPrise – октябрь 2004.
4. Разработка и исследование информационной технологии анимации стереоскопических изображений, синтезируемых из смещенных отображений объекта с нелинейными поверхностями: Отчет о НИР (заключительный) [Текст] // Орловский филиал ИПИ РАН (ОФ ИПИ РАН); Руководитель Архипов О. П. - № ГР 0120.0 500875; Инв. № 0220.0 800879. – Орел, 2007. – С. 20 – 24.
5. Разработка устройства ввода трехмерной информации с использованием средств видеозахвата движения [Электронный ресурс], режим доступа: http://deria.ru/our_sci_invent_glove_3.php.

Архипов Олег Петрович

Орловский филиал Учреждения Российской академии наук Института проблем информатики РАН, г. Орел
Директор ОФ ИПИ РАН, кандидат технических наук
Тел.: +7 (4862) 33-57-41,
E-mail: ofran@orel.ru

Маньяков Юрий Анатольевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Информационные системы»
Тел.: +7 (903) 88-22-689,
E-mail: maniaikov_yuri@mail.ru

Сиротинин Денис Олегович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Информационные системы»
Тел.: +7 (905) 046-38-70
E-mail: vespert@mail.ru

УДК 658.5, 004.7

И.Ю. БАРАНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЭМС-ЭКСПЕРТИЗОЙ

Рассматривается моделирование организационно-технической системы с привлечением распределенной группы экспертов в составе распределенных экспертно-моделирующих систем для обеспечения эффективной работы на различных стадиях жизненного цикла корпоративных автоматизированных систем управления при их сопровождении.

The design of the technical-organizational systems is examined with attraction of the distributed group of expert consisting of distributed expertly-designing system for providing effective job on the different stages of life cycle of the corporate automated control system at their accompaniment.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс принятия решений характеризуется анализом множества данных в пространстве предметной области. В области сложных организационно-технических систем (ОТС), таких как корпоративные автоматизированные системы управления производством, при их сопровождении на различных стадиях жизненного цикла для поддержания требуемой эффективности функционирования необходима поддержка экспертов. Современные компьютерные технологии систем групповой работы (groupware) обеспечивают более тесное взаимодействие экспертов с возможностью проверки своих решений на моделях с использованием распределенного гибкого инструментального комплекса (РГИК). Объединение коллектива экспертов и РГИК позволяет организовать распределенные экспертно-моделирующие системы (РЭМС), обеспечивающие эффективную коллективную работу экспертов с сетевым взаимодействием, в том числе через internet, независимо от территориального размещения.

Для получения начальных количественных характеристик эффективности функционирования организационно-технической системы с экспертно-моделирующей системой необходимо разработать аналитическую модель функционирования начальника отдела в ОТС с учетом влияния на процесс принятия решения результатов работы РЭМС-группы при ограничениях, не учитывающих субъективные особенности (например, волюнтаризм) принятия решений в организационных системах.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОТС

Начальник отдела в организационно-технической системе (ОТС) обеспечивает взаимодействие по выполнению поставленных задач от начальника верхнего звена управления и руководителей доменов (рисунок 1). Для решения каждой задачи начальник отдела формирует РЭМС-группу, в которую включает экспертов (компетентных в данной области решения задачи) из имеющегося списка коллектива экспертов (до 20-ти экспертов). Эксперты могут не являться сотрудниками отдела и могут работать удаленно в комфортных для себя условиях. Взаимодействие экспертов обеспечивается с использованием groupware-технологий.

Сформированная РЭМС-группа (4-6 экспертов) обеспечивает решение задачи путем использования своего опыта и средств РГИК-комплекса по выбранной методике (процедуре) экспертизы. После обработки результатов работы экспертов решение задачи РЭМС-группы представляется начальнику отдела. Начальник отдела оценивает решение с точки зрения соответствия результата исходным данным и допустимым ограничениям, после этого либо

представляет решение задачи начальнику верхнего уровня или руководителю домена либо корректирует условия задачи и направляет ее на повторное решение.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОТС

В связи с тем, что в работе отдела можно выделить поток задач (требований) обслуживающего канала (РЭМС-группу), то функционирование отдела может быть представлено в виде системы массового обслуживания (СМО). Для формализации процесса функционирования в модель СМО необходимо ввести существенные ограничения по деятельности начальника отдела и процесса решения задачи РЭМС-группой для нивелирования субъективных факторов, например, начальник отдела в процессе решения задачи не вмешивается в работу РЭМС-группы для корректировок; сотрудники отдела и эксперты не имеют перерывов на обед и не болеют; приоритетов по поступающим задачам не предусмотрено и т. д.

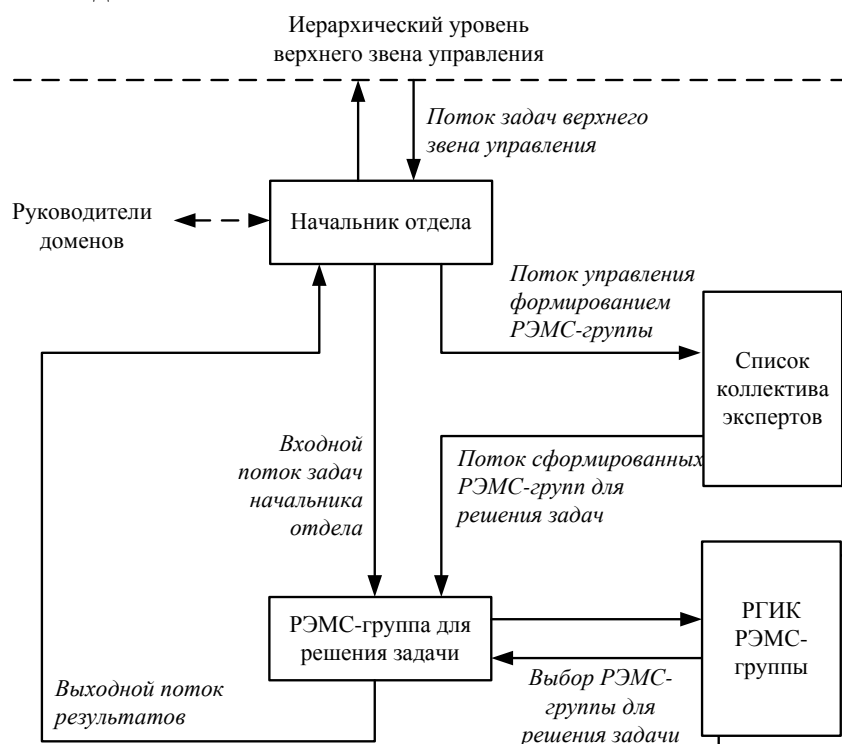


Рисунок 1 – Модель организации ОТС уровня отдела

ОТС управления РЭМС-экспертизой с точки зрения теории массового обслуживания может быть представлена одноканальной системой управления преобразованием входного потока задач начальника отдела в выходной поток результатов. Среди множества разнородных потоков (хозяйственных, финансовых, административных, информационно-технических и т.д.) выделим поток задач по функциональному предназначению отдела. Под каналом обслуживания понимается сформированная начальником отдела для решения задачи РЭМС-группа, при этом не учитываются временные и ресурсные затраты на ее формирование. В связи с характером функционирования отдела (все задачи должны быть решены) система является СМО с ожиданием (очередью). Источниками нагрузки являются начальник верхнего звена управления и руководители доменов.

ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ

Для построения модели СМО необходимо учесть ряд ограничений:

1. Число источников нагрузки (начальников верхнего звена управления и руководителей доменов) ограничено.

2. Число обслуживающих каналов (РЭМС-групп) равно единице. Обслуживающий канал является полнодоступным для решаемых задач (запросов).

3. На вход системы подается простейший поток задач с интенсивностью λ и имеет свойства стационарности, отсутствия последействия, ординарности.

4. Время обслуживания задач (длительность занятия обслуживающего канала) является случайной величиной и распределено по показательному закону

$$F(t) = P(t_3 < t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (1)$$

где μ – параметр показательного закона распределения потока освобождения; t_3 – средняя длительность обслуживания задачи; $\mu=1/t_3$.

5. Длина очереди не ограничена.

6. Число фаз обслуживания равно единице (при этом фаза формирования РЭМС-группы не рассматривается).

7. Дисциплина обслуживания запросов принята типа FIFO («первым пришел, первым обслужен»).

8. Канал обслуживания считается надежным (в процессе работы не выходит из строя).

9. Устройство управления процессом решения задач является централизованным.

По классификации Кендалла-Башарина такую модель можно отнести к классу моделей M/M/1/r=∞/0/FIFO – показательный входной поток и время обслуживания задач, один обслуживающий канал, очередь бесконечной длины, без приоритетов, с выборкой из очереди по порядку «первый пришел, первый обслужен». Вследствие допущения пуассоновского характера потоков задач, приводящих к изменению состояний системы СМО, процесс, протекающий в ней, будет марковским.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССМАТРИВАЕМОЙ СМО

Финальные выражения для рассматриваемой СМО представляются следующим образом [2, 3]:

1. Среднее число задач (заявок) в очереди

$$L_{оч} = \frac{\rho^{m+1} p_0}{m!m(1-\rho/m)^2} = \frac{\rho^2}{1-\rho}, \quad (2)$$

где ρ – приведенная интенсивность потока заявок $\rho=\lambda/\mu$, μ – параметр показательного закона распределения потока заявок, m – число обслуживающих узлов.

2. Среднее число задач в системе

$$L_{сист} = L_{оч} + \rho = \frac{\rho}{1-\rho}. \quad (3)$$

3. Среднее время пребывания задачи в очереди и в системе

$$W_{оч} = \frac{1}{\lambda} L_{оч}, \quad W_{сист} = \frac{1}{\lambda} L_{сист}. \quad (4)$$

4. Вероятность того, время ожидания задачи в очереди не превысит допустимого

$$P(t_{ож} \leq t_{дон}) = 1 - \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)} p_0 e^{-\mu(m-\rho)t_{дон}}, \quad (5)$$

где p_0 (при условии, что $m>\rho$) равно [6]

$$p_0 = \left[\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!(m-\rho)} \right]^{-1}. \quad (6)$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Полученные результаты моделирования с существенными ограничениями на процесс функционирования отдела позволяют в первом приближении сделать следующие выводы:

- при исходных данных (среднее время, отводимое на решение задачи, принято равным 3 часа, интенсивность входящего потока задач составляет 0,2 задачи в час, один обслуживающий канал) очередь задач, находящихся в системе на обслуживании, расти не будет, то есть наблюдается стационарный процесс функционирования ОТС;

- граница стационарного режима составляет $m \leq \rho$, что достигается при интенсивности входящего потока задач, равного 0,3 задачи в час, превышение этого порога приведет к неограниченному росту очереди и, как следствие, неэффективной работе отдела;

- в среднем каждая задача может быть решена в течение рабочего дня (8 часов), если поступит в его начале;

- для повышения эффективности функционирования отдела необходимо снижать среднее время решения одной задачи за счет интенсификации работы РЭМС-группы (тобсл < 3 час.) и/или распараллеливать обслуживание задач за счет создания дополнительного канала обслуживания ($m > 1$);

- в случае введения приоритетов на решение задач необходимо построение другой модели, учитывающей данный фактор.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРТОВ РЭМС-ГРУППЫ С РГИК-КОМПЛЕКСОМ

Для повышения эффективности функционирования РЭМС-группы используется РГИК, равноправный доступ к которому имеют все эксперты группы при решении задачи. Процедура поиска и выбора модели в РГИК выглядит следующим образом [4, 5, 7, 8].

1. В РГИК РЭМС-группы в качестве реализационной схемы взаимодействия приложений выступает сервер управления запросами. Эксперт РЭМС-группы с использованием web-браузера формализует запрос на моделирование к РГИК.

2. Запрос пересылается серверу управления запросами с использованием стандартного протокола http и содержит имя модели, полученное из справочника администратора и указанные входные данные для нее.

3. Сервер управления запросами в соответствии с внутренней схемой (таблицей) соответствия определяет соответствие имени модели и адресов размещения в РГИК серверов моделирования с требуемой для данной модели системой моделирования.

4. После выбора одного из серверов моделирования (при равных приоритетах выбирается сервер, время отклика от которого меньше), поступающий запрос сервер управления запросами диспетчирует на выбранный сервер. Для снижения общей нагрузки на сервер, очередь запросов к каждому серверу моделирования формируется на самом сервере моделирования.

5. На выбранном сервере моделирования загружается требуемая система моделирования, которая по указанному имени модели вызывает ее из своей или удаленной распределенной базы моделей и подставляет входные данные, полученные от клиента.

6. По окончании вычислений результат записывается в файл отчета, после чего сервер моделирования выбирает следующую модель из своей очереди или заканчивает свою работу, переходя в режим ожидания или продолжения выполнения ранее прерванной задачи.

7. Результаты моделирования в виде файла отчета возвращаются в сервер управления запросами, который переправляет его посредством http-протокола эксперту РЭМС-группы.

8. Эксперт РЭМС-группы обрабатывает полученный результат, после чего принимает решение на формирование следующего запроса или завершения моделирования.

Редирекция, то есть передача запроса для его обслуживания на другой сервер управления запросами, возможна в ряде случаев, например при функциональном или физическом отказе «своего» сервера моделирования, при занятости требуемой системы моделирования на «своем» сервере, при превышении длины очереди к требуемой системе моделирования на сервере моделирования, при превышении времени ожидания обслуживания и т. п.

В связи с важностью в РГИК среды взаимодействия приложений, в работах [4, 5] в качестве системы взаимодействия приложений в РГИК-комплексе, повышающей эффективность его функционирования, выбрана схема взаимодействия приложений на основе технологии CORBA. Основные характеристики СМО для математической модели схемы взаимодействия приложений приведены ниже.

1. Вероятность наличия очереди $P(\text{тож} > 0)$.

$$P(t_{ож} > 0) = \frac{C_{N-1}^V}{C_{N-1}^V + E_{N-V-1}\left(\frac{V}{t_3 \cdot \alpha}\right) \cdot \sum_{i=0}^{V-1} C_{N-1}^i \left(\frac{1}{\alpha \cdot t_3}\right) \cdot (\alpha \cdot t_3)}, \quad (7)$$

где $E_{N-V-1}(V/t_3\alpha)$ – условная запись эрланговских потерь:

$$E_{N-V-1}\left(\frac{V}{t_3 \cdot \alpha}\right) = \frac{\left(\frac{V}{t_3 \cdot \alpha}\right)^{N-V-1}}{(N-V-1)! \cdot \sum_{i=0}^{N-V-1} \frac{\left(\frac{V}{t_3 \cdot \alpha}\right)^i}{i!}}. \quad (8)$$

2. Вероятность того, что время ожидания не превысит требуемую величину $P(\text{тож} > t_{доп})$:

$$P(t_{ож} > t_{доп}) = P(t_{ож} > 0) \cdot \frac{\left(\frac{t_{св} + t_{доп}}{t_{св}}\right)^{N-V-1} \cdot E_{N-V-1}\left(\frac{V \cdot t_{св}}{t_3}\right)}{E_{N-V-1}\left(\frac{V \cdot (t_{св} + t_{доп})}{t_3}\right)} \cdot e^{-\frac{V \cdot t_{доп}}{t_3}}, \quad (9)$$

где t_3 – длительность занятия канала обслуживания; $t_{св}$ – продолжительность свободности источника нагрузки:

$$t_{св} = t_3 \cdot \frac{(N-Z)}{Z} - t'_{ср.ож}, \quad (10)$$

где Z – общая поступающая нагрузка, которая определяется из выражения $Z = z \cdot N$, z – удельная поступающая нагрузка от одного источника; $t'_{ср.ож}$ – средняя продолжительность ожидания относительно всех поступающих в систему запросов.

3. Средняя продолжительность ожидания для ждущих запросов $t_{ср.ож}$:

$$t_{ср.ож} = \frac{(N-V) \cdot t_3}{V} - t_{св} \cdot \left[1 - E_{N-V-1}\left(V \cdot \frac{t_{св}}{t_3}\right) \right]. \quad (11)$$

4. Средняя продолжительность ожидания относительно всех поступающих в систему запросов $t'_{ср.ож}$:

$$t'_{ср.ож} = P(t_{ож} > 0) \cdot t_{ср.ож} \cdot \quad (1) \quad 2)$$

Результаты аналитического моделирования показали, что схема взаимодействия приложений на базе технологии CORBA сохранит работоспособность по обслуживанию при одновременном обращении 38 экспертов с интенсивностью от каждого эксперта, равной 0,2 Эрл.

Таким образом, среда взаимодействия приложений не будет являться «узким местом» РГИК для РЭМС-группы (в состав которой, по условию задачи, входит не более 20 экспертов) и основное время работы экспертов может быть сконцентрировано на поиске требуемой модели и анализе результатов ее работы в соответствии с поставленной задачей.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ В РЭМС-ГРУППЕ, ВЫБОР МЕТОДИКИ ЭКСПЕРТИЗЫ

На различных этапах построения и эксплуатации АСУ организации применяются качественные методы оценивания и прогнозирования с привлечением специалистов-экспертов. К ним относят методы типа «мозговой атаки» или коллективной генерации идей; типа «сценариев»; структуризации; типа «дерева целей»; типа «Дельфи»; морфологические; экспертных оценок; организации сложных экспертиз и др.

Для решения задачи при работе РЭМС-группы допустим выбор любого из перечисленных методов, при этом возможно использование нескольких из них для повышения достоверности результата. Метод экспертных оценок наиболее часто применяется при оценивании сложных систем на качественном уровне [9]. Получаемое в результате обработки обобщенное мнение экспертов принимается как решение задачи. Обязательными этапами экспертизы являются формирование цели, выбор процедуры экспертизы, выбор шкалы оценивания, формирование группы экспертов, проведение опроса, анализ и обработка информации. При обработке результатов при ранжировании проводится количественная оценка степени согласованности экспертных оценок. В качестве меры согласованности мнений экспертов выбирается дисперсионный коэффициент конкордации [10, 11]. На практике достоверность работы экспертов считается хорошей, если коэффициент конкордации лежит в интервале 0,7...0,8 [11].

По результатам экспертного оценивания выбирается альтернатива решения задачи, поставленной начальником отдела. Результат решения задачи представляется начальнику отдела. В случае соответствия результата исходным данным и допустимым ограничениям, начальник отдела либо докладывает о выполнении задачи начальнику верхнего уровня или руководителю домена и расформирует РЭМС-группу либо корректирует условия задачи и направляет ее на повторное решение.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования организационно-технической системы с распределенной экспертно-моделирующей системой показывают возможность принятия решения руководителем в установленные сроки при жестко заданных временных рамках, наложенных на работу экспертов. При этом задача, поставленная в начале рабочего дня, в среднем будет в этот день решена. Однако наложенные ограничения на модель позволяют говорить о получении быстрых начальных количественных оценках эффективности функционирования

ОТС с РЭМС-группой. После получения предварительных оценок в дальнейшем требуется их уточнение моделями второго уровня (имитационными, полунатурными и др.), требующими больших временных затрат на их разработку под конкретные условия функционирования и возможную адаптацию для конкретного эксперта или подгруппы экспертов в РЭМС-группе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель, Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст] / Е.С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 208 с.
2. Корнышев, Ю.Н. Теория телетрафика [Текст]: учебник для вузов / Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.
3. Бочков, М.В. Основы моделирования систем массового обслуживания [Текст] / М.В. Бочков, В.Н. Иванов, А.И. Обрезков. – Орел: ВИПС, 1999. – 80 с.
4. Воробьев, А.А. Разработка интеллектуальной системы административного управления процессами настройки операционных систем АСУП [Текст]: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.13.06 / А.А. Воробьев – Орел: Библиотека ОрелГТУ, 2005. – 157 с.
5. Баранов, И.Ю. Исследование гибкого инструментального комплекса для интеллектуальной системы административного управления в корпоративных АСУП [Текст]: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.13.06 / И.Ю. Баранов – Орел: Библиотека ОрелГТУ, 2006. – 160 с.
6. Гиеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б.В. Гиеденко, И.Н. Коваленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 336 с.
7. Воробьев, А.А. Архитектура распределенной базы моделей сети гибких инструментальных комплексов [Текст] / А.А. Воробьев, В.Г. Гришаков, Е.В. Лебеденко, А.В. Молчанов // Военный институт правительственной связи. – Орел, 1999 г. Деп. в ВИНТИ. №1501–В36 от 10.02.1999 г.
8. Пирогов, В.В. Методика сравнительного анализа альтернатив распределенных систем управления гибридным моделированием объектов корпоративных информационно-вычислительных сетей [Текст] / В.В. Пирогов, А.А. Воробьев, И.Ю. Баранов // Депонированная научная работа в ВИНТИ №621-В2002, 2002. – 17 с.
9. Евланов, Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении [Текст] / Л.Г. Евланов, В.А. Кутузов. – М.: Экономика, 1978. – 133 с.
10. Литвак, Б. Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа [Текст] / Б.Г. Литвак – М.: Радио и Связь, 1982.
11. Острейковский, В. А. Теория систем [Текст]: Учебник для вузов по специальности АСОИУ / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 1997. – 240 с.

Баранов Игорь Юрьевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники

Адрес: г. Орел, ул. Приборостроительная, д.35

E-mail: i_baranov@rambler.ru

А.Н. ПОТАПЕНКО, Е.А. КАНУННИКОВА, Л.И. КОЛТУНОВ

ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ИНВЕРСИИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА И СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Представлены математические модели с учетом применения модифицированного метода инверсии для полубезграничных сред при исследовании особенностей электростатических полей распределенных систем ионизации воздуха и стержневых молниеотводов. Определено влияние расположения коронирующего провода ионизатора в угловой зоне помещения с учетом его смещения относительно плоскостей этой зоны и представлены результаты расчетов для стержневых молниеотводов с учетом сравнения с известными.

The paper presents the mathematical models taking into account the usage of the modified numeric inversion method for semi-infinite mediums for the research of the features of electrostatic fields for distributed systems of air ionization and lightning rods. We study the effect of placement of the corona-forming ionizing wire in the corner of the room taking into account its displacement relative to the planes of the area and we present the calculation result for the lightning rods comparing to the already published data.

В прикладных исследованиях, связанных с расчетом высоковольтных электрических полей, необходимо решать задачи, которые относятся к классу внешних краевых задач. Например, новые технологии фильтрации и ионизации воздуха предоставляют совершенно новые возможности для создания сбалансированного аэроионного состава воздуха в помещениях зданий и сооружений. При этом электростатические системы для процессов фильтрации и ионизации воздуха, в которых используются блоки питания высокого напряжения (до 20 кВ), могут быть в виде воздухоочистителей-ионизаторов с различными функциональными возможностями, например, [1, 2], или в виде ионизаторов аэроионов, являющихся, как правило, модификациями классического варианта «Люстры Чижевского», например, [3, 4]. Ряд задач по определению электростатических полей систем фильтрации и ионизации воздуха можно отнести к внешним краевым задачам. Например, для ионизаторов воздуха типа «Аэроион-Про» [3] соотношения размеров в условиях их применения в спортивных залах, находятся в следующих пределах:

$$H_l / H_s \leq 1000, \quad H_s / d \leq 100,$$

где H_l – расстояние от одной стены зала до противоположной; H_s – расстояние от коронирующего провода в угловой зоне до ближайшей стены; d – диаметр этого провода, т.е. для этих соотношений размеров задачи для ионизаторов этого типа можно условно отнести к классу внешних краевых задач.

Следующий пример связан с явлениями в сильных электрических полях в виде разрядов атмосферного электричества. При этом системы молниезащит содержат: стержневые молниеотводы, молниеотводы типа «пространственная сетка» (в виде металлической сетки), тросовые молниеотводы (например, для ЛЭП), специальные молниеотводы с учетом применения импульсных электромагнитных устройств, причем первые три типа молниеотводов относятся к пассивным, а последний – к активным типам, например, [5, 6]. Исследования, связанные с современными системами молниезащит и распределенными системами ионизации воздуха типа «Аэроион-Про», являются актуальными, а постановки задач для этих систем относятся к внешним краевым задачам.

Для приближенного решения внешних краевых задач можно использовать методы зеркальных изображений, конечных разностей, конечных элементов и др. При этом исследуемый класс задач пополняется новыми методами решения, среди которых метод полос [7], метод точных искусственных граничных условий [8], метод квазиравномерных сеток [9], метод инверсии внешней области [10, 11] и др. В работе [10] представлены

особенности метода инверсии для численного решения внешних краевых задач для объектов типа «электрод/провод-плоскость/плоскости». В основе этого метода численного моделирования применяется переход от моделируемой области B_σ к составной из B_σ' и B_σ^* с помощью метода инверсии.

Для исследования электростатических полей распределенных систем ионизации воздуха и систем молниезащит в виде стержневых молниеотводов используется модифицированный метод инверсии для полубезграничных сред (МИПБС) [11], позволяющий численно определять особенности полей в этих задачах, основанный на подходе [10].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенности схем для моделирования исследуемых объектов показаны на рисунке 1, при этом на рисунке 1, *a* – схема ионизатора воздуха типа «Аэроион-Про» [3], в конструктивном плане представляет тонкий провод, расположенный вблизи потолка в угловой зоне, подключенный к отрицательному потенциалу высоковольтного блока питания, а на рисунке 1, *б* – схема для моделирования стержневого молниеотвода пассивного типа.

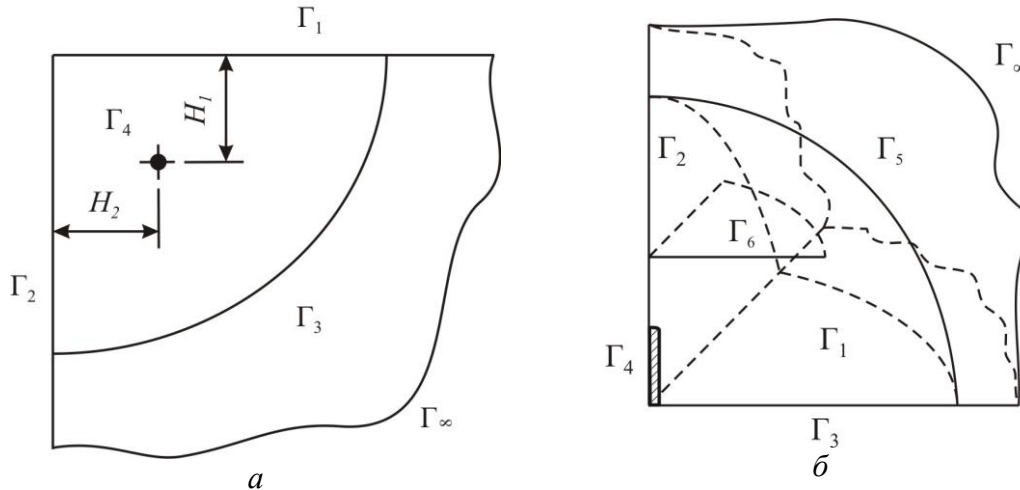


Рисунок 1 – Схемы моделирования распределенной системы ионизации воздуха (*a*) и стержневого молниеотвода системы молниезащиты (*б*)

Рассмотрим особенности математической модели распределенной системы ионизации воздуха с учетом схемы, показанной на рисунке 1, *a*. Краевая задача с учетом плоскопараллельной постановки сводится к определению поля потенциала ψ и напряженности поля, т.е. предполагается стационарность электромагнитных полей и применение уравнения Лапласа, как в [12], в исследуемой области $D(x,y)$:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

с учетом следующих условий:

- на границах Γ_1 и Γ_2 :

$$\psi(x,y) = 0; \quad (2)$$

- на границе Γ_∞ :

$$\psi(\infty) = 0; \quad (3)$$

- на границе Γ_4 :

$$\psi(x,y) = \psi_A. \quad (4)$$

Здесь $D(x,y)$ – расчетная область с границами $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_\infty$; Γ_3 – внутренняя граница в области $D(x,y)$ (искусственная граница для этой краевой задачи с учетом использования модифицированный МИПБС); ψ_A – потенциал на коронирующем проводе.

Считаем, что выделенная основная область $D_k(x,y)$, входящая в состав области $D(x,y)$, имеет форму четверти круга с радиусом R с исходными границами $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$. Для реализации предлагаемого метода необходима дополнительная область $D_k^*(x,y)$ такого же размера, как и $D_k(x,y)$. При этом согласно [10, 11] часть исходной области $D(x,y)$, находящаяся между границами Γ_3 и Γ_∞ , отображается на область $D_k^*(x,y)$ с учетом метода инверсии. В узлах на границах дополнительной области $D_k^*(x,y)$ присваивается нуль (за исключением границы Γ_3 , как внутренней границы $D(x,y)$), что совпадает со значениями ψ на Γ_1, Γ_2 и Γ_∞ .

За основу для расчета пассивных молниеотводов взят известный подход [13] для определения электрического поля в окрестностях стержневых молниеотводов при наличии слабопроводящей ионизированной зоны, при котором вместо объемных зарядов на облаке задается потенциал и принимается напряженность поля в пределах $E_0 = 1$ В/м и менее. Краевая задача (см. рисунок 1, б) в объёмной постановке с учетом одной восьмой шара сводится к определению поля потенциала ψ и напряженности поля в области $D(x,y,z)$ с возможностью применения уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

с учетом следующих условий:

- на границе Γ_1 и на стержне (границе Γ_4):

$$\psi(x,y,z) = 0; \quad (6)$$

- на границе Γ_∞ :

$$\psi(\infty) = 0; \quad (7)$$

- на границах Γ_2, Γ_3 :

$$\partial\psi/\partial n = 0; \quad (8)$$

- на границе Γ_6 :

$$\psi(x,y,z) = \psi_B; \quad (9)$$

где $D(x,y,z)$ – расчетная область, ограниченная $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_\infty$; Γ_5 – внутренняя граница в области $D(x,y,z)$ (искусственная граница с учетом МИПБС); ψ_B – потенциал на стержне.

В этом случае с учетом модифицированного МИПБС некоторая выделенная область $D_m(x,y,z)$, входящая в состав области $D(x,y,z)$, имеет форму части полусферы с радиусом R_0 и с границами $\Gamma_1 - \Gamma_6$ (с учетом упрощения численного моделирования область $D_m(x,y,z)$ может быть в виде куба, параллелепипеда и др.). Для реализации этого метода необходима дополнительная область $D_m^*(x,y,z)$ с учетом вида области $D_m(x,y,z)$ для того, чтобы часть исходной области $D(x,y,z)$ между границами Γ_5 и Γ_∞ , отобразилась на область $D_m^*(x,y,z)$. При этом на границе области $D_m^*(x,y,z)$, расположенной по диаметру некоторой части полусферы, присваивается значение, совпадающее со значением потенциала ψ на бесконечности Γ_∞ .

ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании ионизатора воздуха в виде распределенной системы (см. рисунок 1, а) с учетом уравнения (1) и граничных условий (2) – (4) для дискретной области $D_d(x,y)$ уравнения в операторной форме при определении поля потенциала ψ в узле (i,j) имеют следующий вид:

$$\Omega_h \phi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \phi_{ij} + \Omega_{yy} \phi_{ij} = 0, (x_i, y_j) \in D_d; \\ \phi_{ij} = \phi_A, (x_i, y_j) \in \Gamma_4; \\ \phi_{ij} = 0, (x_i, y_j) \in \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_\infty. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь $\Omega_{xx} = \partial^2/\partial x^2$, $\Omega_{yy} = \partial^2/\partial y^2$, производные потенциала представляются конечно-разностными аппроксимациями в области $D_d(x,y)$. Учитывая, что $D_{kd}(x,y)$ и $D_{kd}^*(x,y)$, входящие в область $D_d(x,y)$, являются частями круга, а граница Γ_4 – это провод, параллельный плоскостям Γ_1 и Γ_2 , поэтому используем универсальную регулярную

прямоугольную сетку. При расчетах не учитывается \emptyset провода, так как он пренебрежимо мал по сравнению с областью $D_d(x,y)$ и шагом по координатам.

Для исследования стержневого молниеотвода (см. рисунок 1, б) по аналогии с предыдущей задачей уравнение Лапласа (5) и граничные условия (6)–(9) в операторной форме для определения поля потенциала ψ в узле (i,j,k) для дискретной области $D_d(x,y,z)$ следующие:

$$\Omega_h \psi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \psi_{ijk} + \Omega_{yy} \psi_{ijk} + \Omega_{zz} \psi_{ijk} = 0, \\ (x_i, y_j, z_k) \in D_d(x, y, z); \\ \Omega_n \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \\ \psi_{ijk} = \psi_B, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_6; \\ \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_\infty. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь $\Omega_{zz} = \partial^2/\partial z^2$, $\Omega_n = \partial^2/\partial n^2$. При этом область $D_d(x,y,z)$, включающая области $D_{md}(x,y,z)$ и $D_{*md}(x,y,z)$, является дискретной с регулярной прямоугольной сеткой, что определяется особенностями схемы моделирования. При расчетах не учитывается \emptyset стержня молниеотвода, так как он пренебрежимо мал по сравнению с его высотой, с областью $D_d(x,y,z)$ и шагом по координатам.

Учитывая, что в решаемых краевых задачах применяется уравнение Лапласа, а отличаются они граничными условиями, рассмотрим особенности дискретной модели и численный метод исследования на примере задачи для ионизаторов воздуха распределенной системы.

В узлах областей $D_{kd}(x,y)$ и $D_{*kd}(x,y)$ значения рассчитываются методом конечных разностей с учетом модифицированного МИПБС. При аппроксимации границы Γ_3 областей $D_{kd}(x,y)$ и $D_{*kd}(x,y)$ (см. рисунок 1, а) с помощью метода Брезенхема образуются углы с учетом шага по сетке области. В связи с этим в граничных узлах этих областей вблизи Γ_3 расчет ведется по формулам, аналогично как для внутренних узлов, а значения в них, не входящих в основную область, берутся из дополнительной области, и наоборот. Так как во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса-Зейделя, то во всех расчетных внутренних узлах области $D_{kd}(x,y) \cup D_{*kd}(x,y)$ потенциал $\psi_{i,j}$ рассчитывается с помощью численного метода, например, экстраполяционного метода Либмана [14] по формулам:

$$\phi_{i,j} = \frac{\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1}}{4}, \quad (12)$$

$$\phi_{i,j}^S = \phi_{i,j}^{S-1} + \alpha(\phi_{i,j}^{S0} - \phi_{i,j}^{S-1}), \quad (13)$$

где α – ускоряющий коэффициент ($1 \leq \alpha \leq 2$); $\psi_{i,j}^{S-1}$ – значение в узле $\psi_{i,j}$, вычисленное на предыдущей итерации; $\psi_{i,j}^{S0}$ – значение в узле $\psi_{i,j}$, вычисленное в текущей итерации согласно (12); $\psi_{i,j}^S$ – новое значение.

Компоненты напряженности электрического поля E_x и E_y с использованием центрально-разностной аппроксимации определяются следующим образом:

$$(E_{i,j})_x = -(\partial\psi_{i+1,j} - \partial\psi_{i-1,j})/2h; \quad (E_{i,j})_y = -(\partial\psi_{i,j+1} - \partial\psi_{i,j-1})/2h, \quad (14)$$

где i – изменение по координате x ; j – изменение по координате y .

Модуль напряженности поля в i -ой точке области с учетом (14) определяется в виде

$$|E|_i = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (15)$$

Для вычисления других линейных электрических параметров исследуемых объектов в виде распределенных систем ионизации воздуха и стержневых молниеотводов можно воспользоваться подходом, как в [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Особенности численного исследования распределенных систем ионизации воздуха и стержневых молниеотводов связаны с определением поля электрического потенциала φ и эквипотенциальных поверхностей в виде уравнений $\varphi_i = \text{const}$, а также расчетом поверхностей равных напряженностей электростатического поля в виде уравнений $E_i = \text{const}$.

При расчетах ионизаторов воздуха исследовалось влияние изменения соотношений $H_1/H_2 = \text{const}$ (см. рисунок 1, *a*) на величину напряженности поля, причем на разных уровнях относительно границы Γ_1 . Типовые результаты расчета распределения поверхностей $E_i = \text{const}$ с шагом ΔE в окрестностях коронирующего провода при изменении $H_1/H_2 = \text{const}$ показаны на рисунках: 2, *a* при условиях $H_1^* = H_1/h$ и $H_{2m}^* = 0,5H_2/h$ и 2, *б* при условиях $H_{1m}^* = 0,5H_1/h$ и $H_2^* = H_2/h$ (h – нормирующая величина равная H_1).



Рисунок 2 – Распределение поверхностей $E_i = \text{const}$ с шагом ΔE при условиях:
a – $H_1^* = H_1/h$ и $H_{2m}^* = 0,5H_2/h$; *б* – $H_{1m}^* = 0,5H_1/h$ и $H_2^* = H_2/h$

Результаты расчета напряженности E в окрестностях провода при условии $H_1 = H_2$ (провод расположен симметрично относительно Γ_1 и Γ_2) в виде распределения $\varphi_i = \text{const}$ с шагом $\Delta\varphi$ и поверхностей $E_i = \text{const}$ с шагом ΔE показаны на рисунках 3, *a* и 3, *б*. При смещениях провода к любой из границ Γ_1 или Γ_2 относительно оси симметрии (см. рисунки 2, *a* и 2, *б*) максимальная напряженность поля на уровне $H_k^* = 2H_1/h$ от границы Γ_1 уменьшается по сравнению с его симметричным расположением (см. рисунок 3, *б*), однако максимальная напряженность на проводе при этом увеличивается в пределах 10 %.



Рисунок 3 – Распределение эквипотенциальных поверхностей с шагом $\Delta\varphi$ (*a*) и поверхностей равных напряженностей поля с шагом ΔE (*б*) при $H_1 = H_2$

Схема моделирования ионизаторов воздуха в виде распределенной системы, показанная на рисунке 4, *a* соответствуют схеме, показанной на рисунке 1, *a*, при этом граница Γ_3 состоит из двух границ Γ_{31} и Γ_{32} , т.е. в схеме (см. рисунок 4, *a*) с учетом плоскопараллельной постановки задачи дуга аппроксимируется двумя плоскостями Γ_{31} и Γ_{32} . С учетом схемы моделирования (см. рисунок 4, *a*), выполнялись аналогичные расчеты при

исследовании ионизатора на основе уравнения (1) и граничных условий (2) – (4), при этом границы Γ_{31} и Γ_{32} – это внутренние границы области $D(x,y)$ (искусственные границы с учетом модифицированного МИПБС), которые учитываются только при численном решении задачи.

Анализ решения краевой задачи на основе этой схемы показал, что распределения эквипотенциальных поверхностей поля и поверхностей равных напряженностей поля практически совпадают вблизи коронирующего провода, причем максимальная погрешность расчетов находится при приближении к общей границе дискретных областей $D_{kd}(x,y)$ и $D_{kd}^*(x,y)$. Установлено, если области $D_{kd}(x,y)$ и $D_{kd}^*(x,y)$ в плоскости сечения представлены в виде квадратов, тогда погрешность находится в пределах 6,5 % по сравнению с областями в плоскости сечения в виде четвертой круга с учетом условия $R = 5H_1$.

Для количественного анализа результатов численных расчетов (см. рисунки 2 и 3) рассмотрим распределение модуля напряженности E^* на уровне $H_k^* = 2H_1/h$ от границы Γ_1 , показанное на рисунке 4, б, при этом величины представлены в относительных единицах с учетом следующих соотношений:

$$E_s^* = -\partial\psi^*/\partial s^*; \quad \psi_i^* = \psi_i/\psi_A; \quad s_i^* = s_i/h; \quad L_i^* = L_i/h.$$

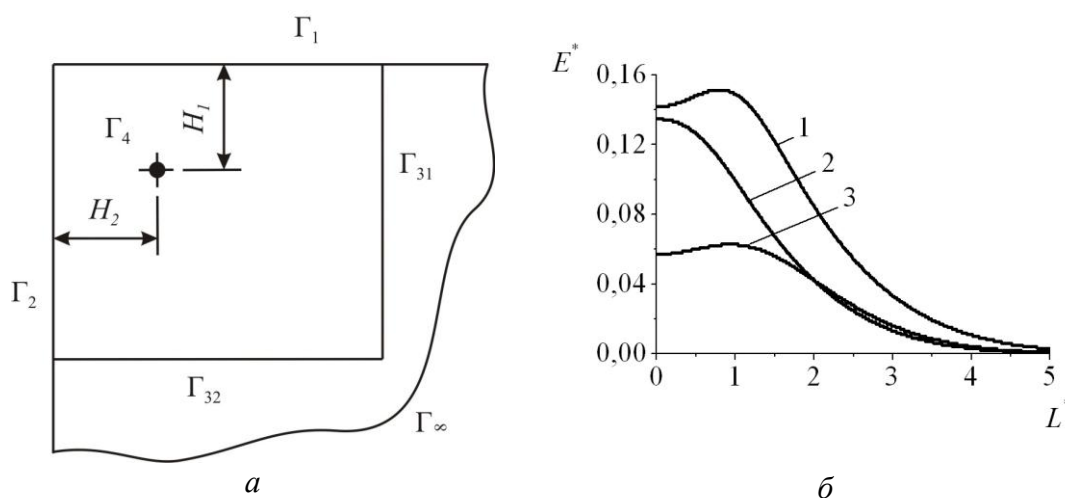


Рисунок 4 – Упрощенная схема моделирования ионизаторов воздуха (а) и распределение напряженности поля E^* на уровне $H_k^* = 2H_1/h$ (б) для трех случаев:

$$1 - H_1 = H_2; \quad 2 - H_1^* = H_1/h \text{ и } H_{2m}^* = 0,5H_2/h; \quad 3 - H_{1m}^* = 0,5H_1/h \text{ и } H_2^* = H_2/h$$

Из анализа результатов (см. рисунок 4, б) следует, что на уровне $H_k^* = 2H_1/h$ относительно границы Γ_1 при смещении провода к границе Γ_2 максимальная величина модуля напряженности поля E_m^* меньше чем при симметричном его расположении, но значительно больше (более 2-х раз), чем при смещении провода к границе Γ_1 . При переходе с уровня $H_k^* = 2H_1/h$ относительно границы Γ_1 (см. рисунок 4, б) к $H_{kl}^* = 3H_1/h$ получаем следующее. Максимальная величина модуля напряженности поля для этих условий резко уменьшается. Например, на уровне $H_{kl}^* = 3H_1/h$ относительно границы Γ_1 при симметричном расположении провода относительно границ Γ_1 и Γ_2 (условие $H_1 = H_2$) величина E_m^* уменьшается до 4-х раз, при условии $H_{2m}^* = 0,5H_2/h$ и $H_1^* = H_1/h$ величина E_m^* уменьшается более, чем в 5 раз, при условии $H_{1m}^* = 0,5H_1/h$ и $H_2^* = H_2/h$ величина E_m^* уменьшается в пределах 4-х раз по сравнению с исходными данными (см. рисунок 4, б). Эти результаты необходимо учитывать при монтаже коронирующего провода для ионизаторов воздуха типа «Аэроион-Про» [3].

Исследовался также стержневой молниеотвод системы молниезащиты на основе модифицированного МИПБС с учетом известных данных [13] (представлены в системе СИ). В первом варианте граница Γ_6 находится на высоте $H = 3l$ и её радиус равен $10l$. Результаты расчетов по этому варианту представлены на рисунке 5, а с учетом результатов [13] для сравнительного анализа распределения ψ .

Кроме того, были выполнены расчеты с учетом известных данных [13] для второго варианта. При этом исследовалось два стержня, расположенных соответственно на границах Γ_1 и Γ_6 , причем смещенных друг относительно друга в вертикальной плоскости и направленных навстречу друг другу (по аналогии с рисунком 1, б). Постановка задачи соответствует уравнению Лапласа (5) и граничным условиям (6)–(9), так как эти стержни расположены соответственно на границах Γ_1 и Γ_6 . При этом исходное условие на границе Γ_6 со стержнем с учетом данных [13] соответствует $\psi_B = 1$ В. Расстояние от плоскости Γ_1 до Γ_6 составляет 2,4 м. С учетом симметрии задачи вертикальная ось OY проходит между стержнями посередине (по аналогии с рис. 1, б), при этом расстояние между стержнями 0,4 м. Длина стержня, находящегося на границе Γ_1 , равна 1 м, длина стержня, находящегося на границе Γ_6 , равна 1,3 м. Результаты расчетов по этому варианту представлены на рисунке 5, б.

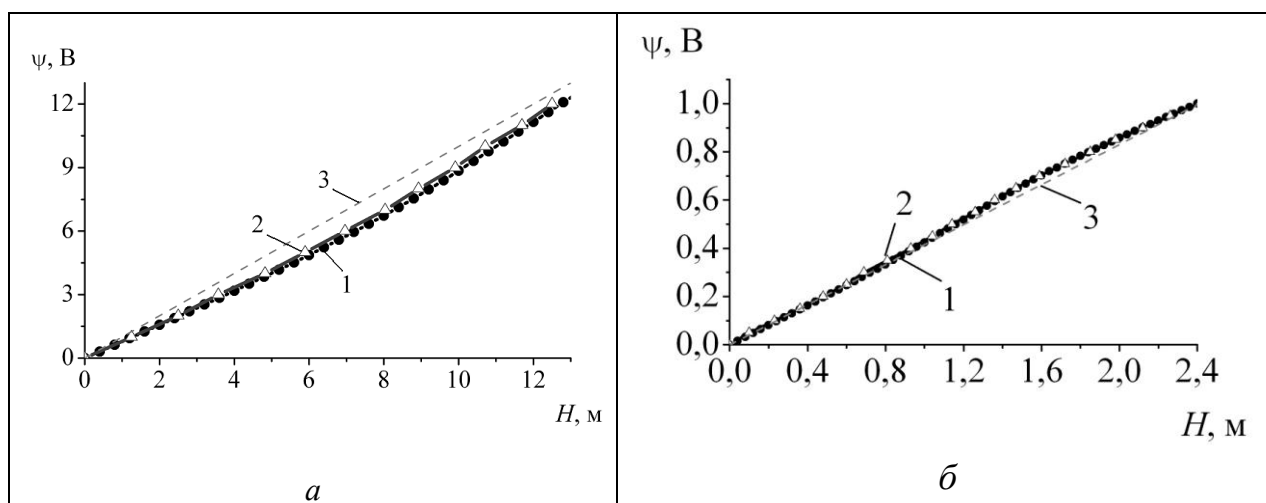


Рисунок 5 – Распределение ψ для стержневого молниеотвода при $E_0 = 1$ В/м (а) и для двух стержней, находящихся на границах Γ_1 и Γ_6 , при $E_0 = 0,42$ В/м (б):
1 – расчет МИПБС; 2 – данные [13]; 3 – распределение ψ при заданном E_0

Сравнение результатов расчета для стержневого молниеотвода по 2-м методам проводилось в вертикальной плоскости на расстоянии $S_{kl} = 3,2$ м от центра молниеотвода (см. рисунок 5, а), причем максимальная высота распределения поля потенциала была представлена в [13] до уровня порядка $H_{k3} = 13$ м. Анализ результатов расчета показал (см. рисунок 5, а, кривая 1 и 2), что распределения потенциалов ψ по вертикали на расстоянии S_{kl} отличаются менее чем на 0,5 %. Сравнение результатов расчета для двух стержней по 2-м методам проводилось в вертикальной плоскости на расстоянии $S_{k2} = 0,6$ м по оси OX относительно оси OY . Анализ результатов расчета показал (см. рисунок 5, б, кривая 1 и 2), что максимальная погрешность распределения потенциалов ψ менее 4,0 %. При этом распределения потенциала ψ в виде характеристик 1 и 2, полученные при расчетах по 2-м методам и для двух вариантов (см. рисунок 5), коррелируют между собой.

В заключение необходимо отметить следующее. Анализ результатов численных расчетов электростатических полей распределенных систем ионизации воздуха и систем молниезащит в виде стержневых молниеотводов показал возможность применения модифицированного МИПБС для их исследования. При этом установлены закономерности для ионизаторов воздуха распределенной системы с учетом возможности уменьшения максимума напряженности E_m^* на уровне ниже расположения коронирующего провода. Например, этот провод необходимо располагать вблизи потолка по его периметру, но при асимметричном расположении его в угловых зонах, что приведет к существенному уменьшению максимума напряженности E_m^* . Качественные и количественные совпадения результатов математического моделирования исследуемых объектов с результатами других авторов подтверждают достоверность полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коззи, К. Автономные воздухоочистители [Текст] / К. Коззи // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2002. № 5. С. 56–59
2. <http://www.superplus.ru>
3. <http://www.ion.moris.ru>
4. <http://www.ionization.ru>
5. Базелян, Э.М. Физические и инженерные основы молниезащиты [Текст] / Э.М. Базелян, Б.Н. Горин, В.И. Левитов. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 327 с.
6. <http://www.prevelectron.ru>
7. Yang, Y. The strip simulation method for computing electric field on conductor surfaces / Y. Yang, D. Dallaire, J. Ma, and F.P. Dawalibi // Proceedings of the Third IASTED International Conference on Power and Energy Systems, EuroPES 2003, Marbella, Spain, Sept. 3-5. – 2003. – P. 353-357.
8. Софронов, И.Л. Точные искусственные граничные условия для некоторых задач аэродинамики и дифракции [Текст]: автореферат дис. доктора физико-математических наук: 01.01.07/ Софронов Иван Львович. – М.: ИПМ РАН им. М.В. Келдыша. – 1999. – 28 с.
9. Альшина, Е.А. Численное решение краевых задач в неограниченной области [Текст] / Е.А. Альшина, Н.Н. Калиткин, С.Л. Панченко // Математическое моделирование. – 2002. – т. 14. – №11. – С. 10-22.
10. Дыльков, М.И. Метод инверсии для численного решения внешних краевых задач для уравнений эллиптического типа [Текст]: дис...канд. физ.-мат. наук: 05.13.18: защ. 17.09.04: утв. 25.12.04 / Дыльков Михаил Иванович. – Белгород, 2004. – 140 с.
11. Потапенко, А.Н. Особенности метода численного исследования воздушных линий электропередач, его тестирование и результаты расчетов [Текст] / А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, М.И. Дыльков. – Вестник БГТУ им В.Г. Шухова. – 2007. – №4 – С. 111–121.
12. Белашов, В.Ю., Хальфиева А.М. Исследование пространственно-временной структуры ЭМ поля, возбуждаемого линиями электропередачи [Текст] / В.Ю. Белашов, А.М. Хальфиева // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2007. – №9-10.- С. 46-51.
13. Резинкина, М.М. Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки [Текст] / М.М. Резинкина // Электричество. – 2005. – № 1. – С. 44–49.
14. Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс) [Текст] / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков – М.: Высш. шк., 1987.– 287 с.
15. Савов, В.Н. Анализ экранированной несимметричной полосковой линии методом граничных элементов [Текст] / В.Н. Савов, Е.С. Богданов, Ж.Д. Георгиев // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 42-46.

Потапенко Анатолий Николаевич

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
 Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и автоматики
 Адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
 Тел.: (4722) 30-99-65
 E-mail: potapenko@intbel.ru

Канунникова Елена Александровна

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
 Аспирант кафедры электротехники и автоматики
 Адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
 Тел.: (4722) 55-63-03
 E-mail: postgraduate@hotmail.ru

Колтунов Леонид Иванович

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
 Руководитель центра информационных технологий при БГТУ им. В.Г. Шухова
 Адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
 Тел.: (4722) 54-93-10
 E-mail: koltunov@intbel.ru

Е.А. ЕМЕЛЬЯНОВА

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ КРИТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИНИЦИИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО ПРОБОЯ

Разработан алгоритм обработки критической ситуации, возникающей при численном моделировании процесса инициирования вакуумного пробоя. Использование разработанного алгоритма позволяет расширить диапазон напряженности электрического поля от $9 \cdot 10^9 \leq E \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ В/м до $6,6 \cdot 10^9 \leq E \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ В/м, который соответствует микросекундному диапазону длительности высоковольтного импульса. Полученные результаты использованы при построении зависимости времени запаздывания вакуумного пробоя от напряженности электрического поля.

The algorithm of handling the critical situation at computational modeling of the vacuum breakdown initiation process has been developed. The usage of developed algorithm allowed widening the range of electric field intensity of the heat distribution model from $9 \cdot 10^9 \leq E \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ V/m to $6,6 \cdot 10^9 \leq E \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ V/m corresponding to microsecond range of high-voltage pulse duration. Received results have been used at plotting the dependence of vacuum breakdown delay time on electric field intensity.

Вакуумный пробой является результатом различных процессов, протекающих на электродах и в межэлектродном промежутке. Использование импульсов напряжения микро- и наносекундного диапазона длительностей сокращает число возможных механизмов инициирования пробоя, сводя их к катодному. При катодном механизме инициирования пробоя является результатом джоулева разогрева эмиттера протекающим через него током.

В [1] рассмотрена задача джоулева разогрева конического эмиттера термоавтоэлектронным током большой плотности и найдено временное распределение температуры в вольфрамовом эмиттере для напряженности электрического поля $9 \cdot 10^9 \leq E \leq 1,3 \cdot 10^{10}$ В/м. Задача решена методом конечных разностей на ЭВМ М-222. Однако полученные результаты соответствуют наносекундному диапазону длительностей.

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать разогрев эмиттера термоавтоэлектронным током большой плотности при напряженности $6,6 \cdot 10^9 \leq E \leq 9 \cdot 10^9$ В/м, соответствующей микросекундному диапазону длительностей.

Задача джоулева разогрева усеченного конического эмиттера (рисунок 1) термоавтоэлектронным током большой плотности имеет вид:

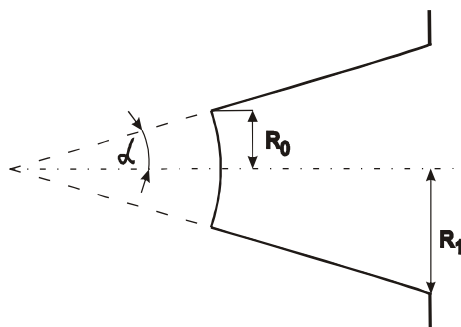


Рисунок 1 – Эмиттер: R_1 – радиус основания, R_0 – радиус вершины, α – половинный угол при вершине

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \kappa_0 T j_0^2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \left(\frac{y}{\sin y} \right)^2 \\ T|_{t=0} = T_0 \\ T|_{r=r_1} = T_0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\pi k T(r_0) \frac{j_0}{e} \left(\frac{y}{\sin y} \right)^2 \cos y \end{array} \right. , \quad (1)$$

где ρ, c, λ – соответственно, плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала эмиттера; κ_0 – коэффициент пропорциональности в зависимости удельного сопротивления от температуры $\kappa(T) = \kappa_0 T$; j_0 – плотность тока, удовлетворяющая уравнению Фаулера-Нордгейма; $r_0 = R_0 / \sin \alpha$, $r_1 = R_1 / \sin \alpha$; $y = \frac{\pi T(r_0)}{2T^*}$;

$T^* = 5,67 \cdot 10^{-9} E \varphi^{-1/2}$ – температура инверсии; φ – работа выхода электрона; T_0 – начальная температура; k – постоянная Больцмана; e – элементарный электрический заряд.

Плотность автоэлектронного тока связана с напряжением электрического поля уравнением Фаулера-Нордгейма [2]:

$$j_0 = 1,54 \cdot 10^{-6} E^2 \varphi^{-1} \exp \left\{ -6,59 \cdot 10^9 E^{-1} \varphi^{3/2} + 10,8 \cdot \varphi^{-1/2} \right\} . \quad (2)$$

Задача решалась для эмиттера с половинным углом при вершине $\alpha = 0,1$ рад и радиусами вершины $R_0 = 10^{-6}$ м и основания $R_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м с помощью автоматизированной системы моделирования импульсного пробоя в вакууме [3]. Начальная температура эмиттера принималась равной $T_0 = 300$ К. В результате расчетов получены зависимости относительной температуры кончика эмиттера $T/T_{пл}$ от безразмерного времени $\tau = j_0^2 \kappa_0 t / \rho c$.

Временная зависимость относительной температуры эмиссионной поверхности эмиттера представлена на рисунке 2.

Из кривых $T/T_{пл} = f(\tau)$ следует, что с уменьшением напряженности электрического поля время достижения температуры плавления $T/T_{пл} = 1$ возрастает, а при $E < 8 \cdot 10^9$ В/м температура эмиттера не достигает точки плавления. Наибольшие значения $T/T_{пл} = 0,83$ и $T/T_{пл} = 0,3$ для кривых 3 и 4 достигаются при значениях безразмерного времени $\tau = 15$ и $\tau = 115$, соответственно.

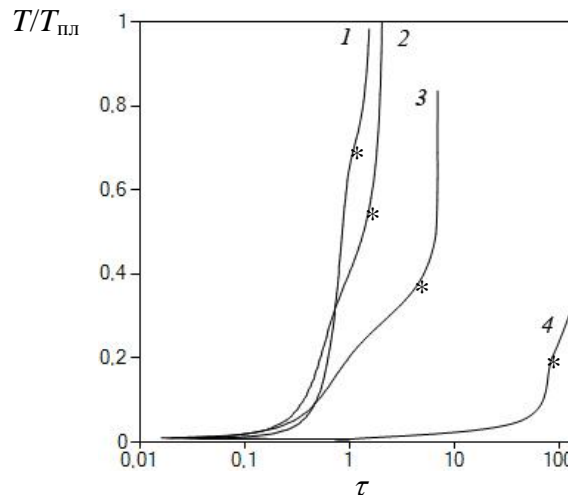


Рисунок 2 – Распределение температуры на эмиссионной поверхности: 1 – $E = 9 \cdot 10^9$ В/м; 2 – $E = 8 \cdot 10^9$ В/м; 3 – $E = 7 \cdot 10^9$ В/м; 4 – $E = 6,6 \cdot 10^9$ В/м

На кривых обозначена звездочкой (*) температура инверсии $T^*/T_{пл}$, при достижении которой калориметрический эффект Ноттингама превращается из греющего в охлаждающий фактор. С уменьшением напряженности E температура инверсии T^* уменьшается и эффект Ноттингама проявляется при меньших температурах, а, следовательно, изменяется и аргумент $y = \frac{\pi T(r_0)}{2T^*}$ функции $y/\sin(y)$. При достижении двойной температуры инверсии $T = 2T^*$ функция $y/\sin(y)$ устремляется в бесконечность, обуславливая появление точки разрыва второго рода, что не позволяет рассчитывать время достижения температуры плавления в микросекундном диапазоне длительностей с помощью численного моделирования процесса инициирования вакуумного пробы.

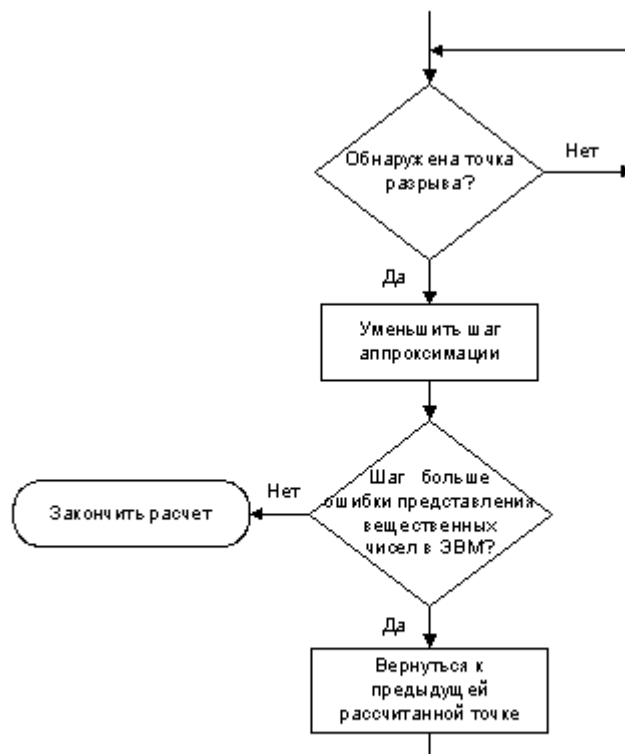


Рисунок 3 – Алгоритм обработки точки разрыва второго рода

Для нахождения максимально возможного значения $T/T_{пл}$ при появлении критической ситуации, связанной с точкой разрыва второго рода, введем алгоритм обработки точки разрыва второго рода (рисунок 3).

Процесс разогрева эмиттера термоавтоэлектронным током большой плотности представляет собой постепенное увеличение температуры в острие, не допускающее отклонения температуры эмиссионной поверхности в сторону охлаждения. Температура в следующий момент времени может быть больше или равна текущей температуре $f_{i+1}(T) \geq f_i(T)$.

Определение точки разрыва осуществляется сопоставлением рассчитанных значений температуры на текущем $f_i(T)$ и следующем $f_{i+1}(T)$ шагах расчета. Если значение, полученное на шаге $i+1$, меньше текущего $f_{i+1}(T) < f_i(T)$, то обнаружена точка разрыва. Для обработки этой ситуации необходимо уменьшить шаг аппроксимации по времени $h = h/2$ и определить возможность его применения. Шаг допустим, если он больше, чем ошибка представления вещественных чисел в ЭВМ $h > \varepsilon$. Уменьшение шага аппроксимации по времени позволяет максимально приблизиться к точке разрыва второго рода.

Если шаг аппроксимации оказывается меньше ошибки представления вещественных чисел в ЭВМ $h < \varepsilon$, расчет необходимо прекратить, так как дальнейшие изменения шага незначительны, а рассчитываемое значение температуры становится постоянным.

Для проверки адекватности предложенного алгоритма рассчитана и построена зависимость времени запаздывания вакуумного пробоя от напряженности электрического поля $t_3(E)$ по результатам, полученным после применения обработчика точки разрыва второго рода (рисунок 4). За время запаздывания принималось время достижения температуры плавления $T/T_{пл} = 1$ или время достижения двойной температуры инверсии $T/2T^*$ при $E < 8 \cdot 10^9$ В/м.

Расчетная зависимость $t_3(E)$ для прямоугольного импульса напряжения с бесконечно коротким фронтом $t_{\phi} = 0$ приведена вместе с известными экспериментальными результатами для прямоугольного импульса напряжения с фронтом $t_{\phi} = 1$ нс [4]. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, совпадая с ними при $E \leq 8 \cdot 10^9$ В/м, что подтверждает правильность выбранного алгоритма.

Таким образом, предложен алгоритм обработки критической ситуации, вызванной появлением точки разрыва второго рода при численном моделировании разогрева эмиттера термоавтоэлектронным током. Применение данного алгоритма позволило рассчитать и построить зависимость времени запаздывания пробоя в вакууме от напряженности электрического поля в диапазоне напряженности $6,6 \cdot 10^9 \leq E \leq 9 \cdot 10^9$ В/м, соответствующем длительности высоковольтного импульса $10^{-8} \leq t_{и} \leq 10^{-4}$ с.

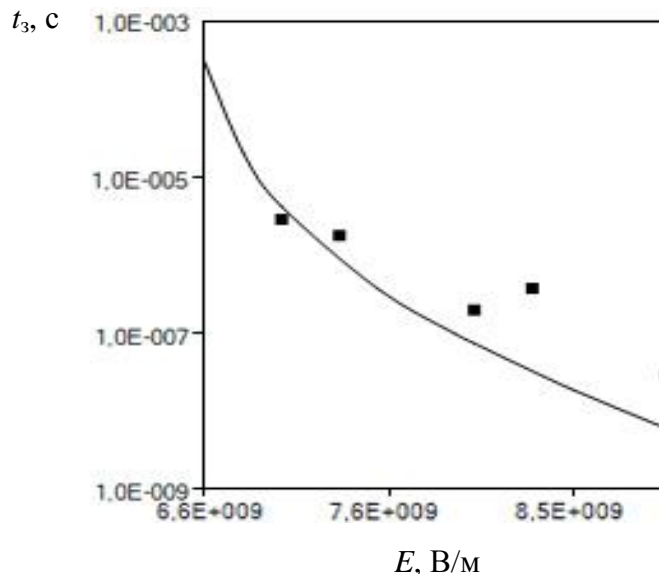


Рисунок 4 – Зависимость времени запаздывания пробоя от напряженности электрического поля: ■ – эксперимент, $t_{\phi} = 1$ нс [4]

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов, Е.А. Разогрев металлического катода термоавтоэлектронным током большой плотности [Текст] / Е.А. Литвинов, А.Ф. Шубин. – М.: Изв. ВУЗов. Физика, 1974, № 1. – С.152-154.
2. Елинсон, М.И. Автоэлектронная эмиссия [Текст] / Г.Ф. Васильев, М.И. Елинсон. – М.: ФизМатЛит, 1958. – 339с.
3. Емельянова, Е.А. Автоматизированная система моделирования и анализа пробоя в вакууме [Текст] / Е.А. Емельянова. – Четвертая МНПК «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития», Томск, ТУСУР, Ч. 1, 2007. – С. 288-290.
4. Месяц, Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме / Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. – М.: Атомиздат, 1984. – 256 с.

Емельянова Екатерина Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Аспирант кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»
 г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел.: (4862)541503
 E-mail: catherine@orel.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Аналитическая модель процессов информационного обмена базируется на аппарате теории массового обслуживания и использует марковские процессы для описания трафика и позволяет проводить анализ и оптимизацию сетей на основе полевых шин без установления соединений.

Analytical model of the informational exchange process is based on the mass service theory principles, and uses Markov's processes to describe the traffic, and lets nets analyzing and optimization on the base of field tires without joints installation.

Моделирование (в широком смысле) является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценок характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы [7].

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегродифференциальных, конечно-разностных и т. п.) или логических условий.

Разнообразие моделей процессов информационного обмена не всегда гарантирует их адекватность множеству практических задач, с которыми приходится сталкиваться при проектировании сетей промышленной автоматизации (СПА). Причина заключается в противоречивости требований к этим моделям и важности представления тех или иных особенностей функционирования СПА.

Процесс информационного обмена (ПИО) представляет собой некоторую последовательность действий (операций), связанных с передачей сообщения или его отдельных фрагментов от источника информации к потребителю, соединенных каналом связи, т. е. информация – заявка на обслуживание, а канал – обслуживающий прибор. Таким образом, для исследования ПИО в СПА представляется возможным применение непрерывно-стохастических моделей, называемых Q-схемами или схемами систем массового обслуживания.

Под системой массового обслуживания (СМО) понимается система, в которой присутствует обслуживающий прибор и заявка на обслуживание. Основу теории массового обслуживания составляют вероятностные процессы. [2, 3, 4]

Рассмотрим марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, для которого X_n – дискретное значение процесса на n-м шаге. Процесс является марковским (цепью Маркова), если выполняется условие

$$P[X_n = i_n | X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1] = P[X_n = i_n | X_{n-1} = i_{n-1}]. \quad (1)$$

Таким образом, состояние в настоящий момент определяет будущее течение этого процесса.

Пусть

$$p_i^{(n)} = P[X_n = i] \quad (2)$$

и вектор этих вероятностей

$$p^{(n)} = (p_0^{(n)}, p_1^{(n)}, \dots). \quad (3)$$

Переходные вероятности за один шаг для однородной цепи Маркова

$$p_{ij} = P[X_n = j | X_{n-1} = i] \quad (4)$$

и, записывая их в виде квадратной матрицы $P = (p_{ij})$, получим результат для зависящих от времени вероятностей этого марковского процесса:

$$P^{(n)} = P^{(n-1)} P. \quad (5)$$

Таким образом, стационарные вероятности можно найти путем решения системы

$$\begin{cases} P^{(n)} = P^{(n-1)} P \\ \sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

где $p_i = \lim_{n \rightarrow \infty} p_i^{(n)}$.

Рассмотрим случай однородного марковского процесса $X(t)$ с дискретными состояниями и непрерывным временем. Процесс является марковским, если выполняется условие (1). Время, в течение которого процесс находится в каждом состоянии, распределено по показательному закону у всех марковских процессов с непрерывным временем. Это единственное непрерывное распределение без памяти. Переходные вероятности

$$p_{ij} = P[X(s+t) = j | X(s) = i], \quad (7)$$

где s – время пребывания заявки в системе (очередь и обслуживание), t – промежуток времени между моментами поступления соседних требований

Пусть $H(t)$ – матрица этих переходных вероятностей. Тогда уравнения Чепмена–Колмогорова запишется, как:

$$H(t) = H(t-s)H(s). \quad (8)$$

Введем матрицу $Q = [q_{ij}]$ и определим её с помощью равенства

$$Q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H(\Delta t) - I}{\Delta t}, \quad (9)$$

где I – единичная матрица. Тогда поведение марковского процесса во времени описывается следующим уравнением:

$$\frac{dH(t)}{dt} = H(t)Q. \quad (10)$$

Решение этого уравнения имеет вид [9]:

$$H(t) = e^{Qt}. \quad (11)$$

Установившийся режим этого процесса, а именно стационарные вероятности p , определяются из основного уравнения

$$pQ = 0 \quad (12)$$

с учетом нормирующего условия системы (6).

Одним из важных вероятностных процессов в теории массового обслуживания является пуассоновский процесс, описывающий поток моментов поступления требований. В нем промежутки времени между моментами поступления соседних требований независимы и распределены по показательному закону со средним значением $\bar{t} = 1/\lambda$.

Вероятность $P_k(t)$ поступления k требований в течение промежутка времени длиной t секунд определяется, как

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (13)$$

Среднее число требований, поступающих в течение этого промежутка времени,

$$\bar{N}(t) = \lambda t, \quad (14)$$

а дисперсия определяется равенством

$$\sigma_{N(t)}^2 = \lambda t. \quad (15)$$

Предположение о показательном распределении промежутков времени между моментами поступления требований означает, что его плотность равна

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \lambda \geq 0. \quad (16)$$

В класс марковских процессов с непрерывным временем входит процесс размножения и гибели, в котором состояние системы за любой бесконечно малый промежуток времени изменяется не больше, чем на единицу. В таких случаях говорят об интенсивности размножения λ_k , являющейся средней скоростью рождения (поступления новых требований в состоянии, когда система содержит k требований), а также об интенсивности гибели μ_k , которая равна средней скорости гибели (ухода требований из системы в случае, когда в системе содержится k требований). Зависящее от времени поведение такой СМО описывается равенством (11). Для этого класса процессов уравнение, определяющее стационарный режим, принимает вид:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}, \quad (17)$$

где

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}}. \quad (18)$$

Применение этого решения для стационарного режима непосредственно приводит к классу элементарных СМО.

Классическим является пример простейшей системы $M/M/1$. Ее поведение во многих отношениях подобно поведению более сложных СМО [4].

На вход системы $M/M/1$ поступает пуассоновский поток (с интенсивностью λ), система совершает единичные (ординарные) переходы (обслуживание и поступление одного требования), и среднее время обслуживания $\bar{x} = 1/\mu$. Такое распределение имеет вид

$$p_k = (1 - \rho)\rho^k, \quad (19)$$

где ρ – коэффициент использования, определяемый как произведение средней скорости поступления требований в систему на среднее время обслуживания каждого требования $\rho = \lambda \bar{x}$, тогда среднее число требований в системе

$$\bar{N} = \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (20)$$

а дисперсия

$$\sigma_N^2 = \frac{\rho}{(1 - \rho)^2}. \quad (21)$$

Используя формулу Литтла, можно записать две основные характеристики системы $M/M/1$ – ее средние задержки:

$$W = \frac{\rho/\mu}{(1 - \rho)^2}, \quad (22)$$

$$T = \frac{1/\mu}{1 - \rho}. \quad (23)$$

Величины \bar{N} , W и T в зависимости от коэффициента использования ρ растут по мере убывания значения $(1 - \rho)$. Это характерно для системы $M/M/1$, а также для СМО самого общего вида.

Под сетями массового обслуживания понимается набор связанных друг с другом СМО, в которых требования перемещаются из одной СМО в другую некоторым случайным образом до тех пор, пока они не покинут систему в какой-либо точке. Рассмотрим сеть с N

узлами, в i -м узле которой находится СМО с одной очередью и m_i приборами, время обслуживания в каждом из которых распределено по показательному закону со средним значением $1/\mu$. В i -узел поступает извне (по отношению к сети) последовательность требований из независимого пуассоновского источника с интенсивностью γ_i требований в секунду. После обслуживания в i -м узле требование переходит в следующий j -й узел с вероятностью r_{ij} ; таким образом, это требование поступает в j -й узел изнутри (по отношению к сети). Вместе с тем, уходя из i -го узла, требование может покинуть сеть с вероятностью $1 - \sum_{j=1}^N r_{ij}$.

Полная интенсивность потока требований в i -й узел – λ_i требований в секунду. Уравнение для определения интенсивностей λ_i имеет вид

$$\lambda_i = \gamma_i + \sum_{j=1}^N \lambda_j r_{ji}. \quad (24)$$

Узлы рассматриваемой сети независимы. Это можно видеть из выражения для совместного распределения вероятностей застать k_1 требований в первом узле, k_2 требований во втором узле и т. д.:

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = p_1(k_1) p_2(k_2) \dots p_N(k_N). \quad (25)$$

В этом равенстве о независимости свидетельствует произведение распределений в правой части. Причем каждый множитель $p_i(k_i)$ в приведенном равенстве является решением для изолированной СМО типа $M/M/m$, работающей самостоятельно при интенсивности поступающих требований λ_i .

Под замкнутыми сетями массового обслуживания понимают такие марковские сети, в которых требования не могут ни уходить, ни поступать извне. Пусть в сети, подобной описанной выше, находится k требований и они перемещаются из узла в узел, но уйти из сети не могут; то есть для всех i справедливо равенство $1 - \sum_{j=1}^N r_{ij} = 0$. Для таких замкнутых сетей совместное распределение вероятностей наличия определенного числа требований в различных узлах выражается следующим образом:

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = \frac{1}{G(K)} \prod_{i=1}^N \frac{x_i^{k_i}}{\beta_i(k_i)}, \quad (26)$$

где множество чисел $\{x_i\}$ должно удовлетворять следующим линейным уравнениям

$$\mu_i x_i = \sum_{j=1}^N \mu_j x_j r_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (27)$$

$$G(K) = \sum_{k \in A} \prod_{i=1}^N \frac{x_i^{k_i}}{\beta_i(k_i)}, \quad (28)$$

причем $k = (k_1, k_2, \dots, k_N)$, A – множество векторов k , для которого $k_1 + k_2 + \dots + k_N = K$, а

$$\beta(k_i) = \begin{cases} k_i!, & k_i \leq m_i \\ m_i!, m_i^{k_i - m_i}, & k_i \geq m_i \end{cases}. \quad (29)$$

Рассмотрим потоки случайных событий (запросов) для (СПА) [5]. Для простоты можно считать, что они являются пуассоновскими. Это можно показать также качественно.

Все узлы сети дискретны и получают доступ к ресурсу не одновременно. То есть, поток ординарен. Поток запросов в сети идет постоянно, т. е. обладает свойством стационарности. И так как нам не известно, какие алгоритмы запрограммированы в узлах, то поток обладает отсутствием последействия. Таким образом, поток запросов – пуассоновский.

Представим модель СПА с коммутацией сообщений, имеющей M каналов и N узлов [6]. В этой модели предполагается, что M каналов являются бесшумными и абсолютно надежными, а пропускная способность i -го канала равна C_i (бит в секунду). Все N узлов, соответствующих центрам коммутации сообщений (пакетов), предполагаются абсолютно надежными, и выполняющими операции по коммутации сообщений. Допустим, что время обработки в узлах равно K и является постоянными и пренебрежимо малым. Кроме того, в модели имеются очереди к каналам и задержки при передаче. Трафик, поступающий в сеть из внешних источников, образует пуассоновский процесс со средним значением γ_{jk} (сообщений в секунду) для тех сообщений, которые возникают в узле j и предназначаются для узла k . Полный внешний трафик, поступающий в систему (и, следовательно, покидающий ее), определяется, как

$$\gamma = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \gamma_{jk}. \quad (30)$$

Для определения внешнего трафика γ целесообразно использовать анализатор протокола из программного комплекса анализа и оптимизации производительности сетей передачи данных. Для размещения сообщений в узлах сети имеется память неограниченной емкости. В СПА применяется фиксированная процедура маршрутизации. Это означает, что для данной пары источник – адресат на сети имеется только один путь.

Поскольку каждый канал в сети рассматривается как отдельный обслуживающий прибор, обозначим через λ_i среднее число сообщений в секунду, проходящих по i -му каналу. Как и для внешнего трафика, определим полный трафик в каналах сети следующим образом:

$$\lambda = \sum_{i=1}^M \lambda_i. \quad (31)$$

Пусть стоимость построения i -го канала с пропускной способностью C_i задается произвольной функцией $d_i(C_i)$, зависящей от номера и пропускной способности канала. Тогда D – стоимость всей сети, которая состоит из стоимости построения каналов:

$$D = \sum_{i=1}^M d_i(C_i). \quad (32)$$

Примем среднюю задержку сообщения T за главную характеристику сети. Определим среднюю величину Z_{jk} , как задержку сообщения, которое возникло в j и имеет место назначения k . Эти две средние величины связаны равенством

$$T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{\gamma_{jk}}{\gamma} Z_{jk}, \quad (33)$$

так как доля $\frac{\gamma_{jk}}{\gamma}$ полного входящего трафика сообщений имеет в среднем задержку, равную Z_{jk} . Это равенство представляет разложение сети по парам источник–адресат [2, 3]. Таким образом, получена открытая сеть массового обслуживания.

Рассматривая фиксированную процедуру выбора маршрутов, обозначим через π_{jk} путь, по которому идут сообщения, возникающие в узле j и идущие в узел k . В путь π_{jk} включен i -й канал (с пропускной способностью C_i), если сообщения, идущие по этому пути, проходят указанный канал ($C_i \in \pi_{jk}$). Отсюда средняя интенсивность потока сообщений λ_i – в i -м канале должна равняться сумме средних интенсивностей потоков сообщений по всем путям, которые проходят через этот канал:

$$\lambda_i = \sum_j \sum_k \gamma_{jk}, \quad j, k : C_i \in \pi_{jk}. \quad (34)$$

Определим T_i , как время, затраченное на ожидание и процесс передачи по i -му каналу. Это среднее время, проведенное сообщением в системе, где под системой понимается i -й канал (обслуживающий прибор) и очередь сообщений, стоящая перед этим каналом.

Среднее число сообщений, ожидающих или использующих канал, равно

$$\bar{N}_i = \lambda_i T_i. \quad (35)$$

Среднее число сообщений в сети равно

$$\bar{N} = \gamma T = \sum_{i=1}^M \bar{N}_i. \quad (36)$$

Отсюда

$$T = \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\gamma} T_i. \quad (37)$$

Таким образом, рассматриваемая задача анализа T свелась просто к вычислению T_i .

Для того чтобы выразить среднее время, проведенное сообщением в системе, которая представляет собой отдельный канал, воспользуемся результатом Джексона. Погруженный канал можно рассматривать как такой же канал, действующий независимо от сети, но с пуассоновским потоком на входе, интенсивность которого равна интенсивности, задаваемой сетью [8]. Теперь i -й канал можно представить в виде системы $M/M/1$ с пуассоновским потоком интенсивности λ_i на входе и показательным временем обслуживания со средним $1/\mu$ секунд. Решение для T_i получается из равенства (23):

$$T_i = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} \quad (38)$$

и согласно (37):

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i - \lambda_i}. \quad (38)$$

Задачи, связанные с оптимизацией СПА, состоят не только в ее анализе, но и в эффективном и оптимальном проектировании. При любом проектировании практической сети приходится решать большое число задач. К их числу относятся выбор пропускных способностей каналов, принятие процедуры выбора маршрутов, выбор процедуры управления потоками; топологическое проектирование сети, выбор емкости памяти в каждом узле и т. п. [1]. Рассмотрим три основных, используемых при проектировании алгоритма выбора [6]:

1. Пропускных способностей каналов $\{C_i\}$.
2. Потоков в каналах $\{\lambda_i\}$.
3. Топологии.

Все входящие в них параметры можно варьировать с целью улучшения характеристик сети.

Определим одномерный критерий качества системы (среднюю задержку сообщения T) и минимизируем его (и тем самым оптимизируем работу сети). Так как для задач оптимизации требуется включать некоторые стоимостные ограничения, то введем ограничение на стоимость (33). Таким образом, имеются характеристики сети T , стоимостное ограничение D и три варьируемых при проектировании параметра: $\{C_i\}$, $\{\lambda_i\}$ и топология.

При фиксированной процедуре выбора маршрутов доля трафика r_{ij} , который выходит из узла i по каналу, соединяющему узлы i и j (24), равна либо 0, либо 1 в зависимости от места возникновения и места назначения этого трафика сообщений. При этом

подразумевается, что оптимальный выбор трафика в канале $\{\lambda_i\}$ включает отыскание для каждой линии таких теоретических средних интенсивностей потоков сообщений, которые дают минимальную среднюю задержку сообщения.

Определим задачу оптимизации, в которой заданы положения узлов, требования к внешнему трафику γ_{jk} , стоимости каналов $d_i(C_i)$, постоянная D , а также предполагается, что используемые потоки $\{\lambda_i\}$ являются реализуемыми (т. е. они согласуются с пропускными способностями и ограничениями на внешний трафик и на затраты, а также удовлетворяют закону сохранения).

Задача: Выбор топологии, пропускных способностей и распределения потоков (ВПС и РП).

Минимизировать: T .

Варируются: топологические варианты, $\{C_i\}$, $\{\lambda_i\}$.

Ограничение: $D = \sum_{i=1}^M d_i(C_i)$.

Таким образом, при получении основного результата были сделаны предположения, что время обработки в узле и время распространения равны нулю. Используя этот анализ задержки, можно сделать количественные выводы в отношении средней задержки сообщения в таких сетях. При увеличении нагрузки на сеть никакое слагаемое в выражении для задержки не будет доминирующим до тех пор, пока поток в одном из каналов не достигнет пропускной способности этого канала, который соответствует узкому месту сети.

При построении эффективной СПА целесообразно решить оптимизационную задачу. Решение этой задачи в значительной степени зависит от вида стоимостной функций $d_i(C_i)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов, Н. И. Принципы построения промышленных микроконтроллерных сетей в стандартах Profibus и Р-NET [Текст] / Н.И. Артемов, О.Б. Низамутдинов, М.В. Гордеев и др. – Пермь: ПГТУ, НИИУМС, 1996 – 312 с.
2. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987 – 284 с.
3. Кениг, Д. Методы теории массового обслуживания [Текст]: Пер. с нем. /Под. ред. Г. П. Климова. / Д. Кениг, Д. Штойян – М., 1981 – 316 с.
4. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями. Т. 2. [Текст] / Л. Клейнрок. – М.: Мир, 1979 – 368 с.
5. Максаков, С. А. Алгоритмы решения задачи топологической оптимизации корпоративных сетей предприятия [Текст] / С. В. Костин, С. А. Максаков, Е. А. Семашко // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Информационные системы и технологии». Труды участников III Всероссийской научно-практической конференции. Выпуск 2(6). – Орел: Изд-во ОрелГУ, 2006. – С. 239–243.
6. Максаков, С. А. Математическая модель процессов информационного обмена для сетей на основе полевых шин [Текст] / В.Т. Еременко, С.А. Максаков // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника». – Тула: Издательство ТулГУ, 2006, Вып. 9 – С. 127-135.
7. Советов, Б. Я. Моделирование систем: Учебник для вузов [Текст] / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Высшая школа, 1998. – 319 с.

Максаков Сергей Анатольевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Соискатель кафедры «Проектирование и технология радиоэлектронных и вычислительных систем»

Тел.: (0462)-41-29-20, 8-910-301-63-02

E-mail: maksakov@inbox.ru

А.Л. ПРАВДИН

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТРУКТУР ДАННЫХ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе предлагается новый подход концептуального моделирования данных, который может служить основой создания специализированных языков проектирования информационных систем в рамках разработки, основанной на моделях.

New approach for conceptual data modeling suggested. Change of basis of modeling and use of formal approach for models description improve modifiability of model based applications.

Keywords: conceptual design, data models, MDD, OODB, UIMS.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением работы [1], в которой был произведён обзор современных способов моделирования данных для задачи технологической подготовки производства винтовых поверхностей, по результатам которого был сделан вывод о целесообразности создания и использования специализированных языков проектирования наряду с использованием разработки, основанной на моделях, при проектировании программных систем (ПС). В качестве основы такого языка предлагается изложенный в данной работе подход.

Разработка, основанная на моделях (model driven development, MDD [2]), с середины 1990-х является популярной идеей при построении программных систем. Подход подразумевает создание комплексной модели системы, средств её преобразования в прототип программной системы, а также средств синхронизации модели с прототипом и изменяющимися требованиями пользователей системы. Внимание исследователей было сосредоточено на том, как создавать модели и их интерпретаторы на основе существующих концепций моделирования данных и процессов (например, UML, диаграммы состояний [7], ER моделей), однако недостаточное внимание было уделено разработке исходных способов моделирования, наиболее пригодных для создания гибких моделей программных систем.

В работе предлагается новый подход к моделированию данных, который ведёт к построению более гибких моделей систем. Целью работы является формулировка основных положений данного подхода, выявление его преимуществ и ограничений.

1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДХОДА

При разработке подхода ставилась задача обеспечить:

- полноценное концептуальное моделирование с сохранением семантики и возможностью перехода к автоматизированной реализации, основанной на создаваемых моделях;
- модифицируемость [4] моделей, построенных на основе подхода;
- простоту использования подхода;
- формальное описание для возможности расширения и модификации самого подхода.

Был предложен подход, являющийся синтезом и развитием следующих идей:

- Крис Дейт, рассмотрение доменов реляционной модели как объектных классов (по сути, уход от первой нормальной формы) [5];
- Евгений Григорьев, модель «объект-качество» [6];

- индивидуальные и структурные пользовательские типы данных в объектно-реляционных СУБД (ОРСУБД): стандарты SQL:1999, SQL:2003 [3];
- хранение данных реляционных отношений по столбцам в СУБД «Vertica»;
- множественное наследование в C++ и в Java;
- ортогональное проектирование схем реляционных баз данных;
- языки проектирования UML (включая OCL) [9], Express [8], язык определения объектов ODL стандарта ODMG-3 [3];
- модель концептуального моделирования ORM [10].

Изложим предлагаемый подход в виде двух основных положений.

Первое положение предлагаемого подхода – выбор в качестве элементарных объектов концептуального моделирования не классов или сущностей, как это принято во всех технологиях концептуального моделирования, а рассмотрение атрибутов, как элементарных объектов, на основе которых строятся модели. Цель уменьшения базиса моделирования – создание более гибких повторно используемых моделей ПС. От понятия домена вводимое понятие атрибута отличается возможностью сопоставления большей смысловой нагрузки. В стандарте SQL:1999 и SQL:2003 [3,стр.490] понятие домена развивается через индивидуальные и структурные пользовательские типы данных. В понятии атрибута мы объединяем и развиваем указанные понятия.

Второе положение подхода – двухступенчатое моделирование, предполагающее определение каркаса модели в терминах атрибутов с последующим построением моделей конкретной ПО на основе этого каркаса. Часть модели, отвечающая за группировку и взаимодействие атрибутов (сущности и связи), является более изменчивой, чем определение самих атрибутов. Эта изменчивая часть является более высокоуровневым описанием ПС, которое, однако, должно строиться на относительно устойчивом базисе. Этим базисом и может быть схема определения атрибутов. Таким образом, перенеся всю семантику, касающуюся определения атрибутов в соответствующую схему, мы снижаем требование стабильности к более абстрактным моделям ПО, что должно способствовать повышению модифицируемости систем, построенных на основе такого подхода.

Мотивация создания нового подхода к моделированию основывается отчасти на следующей проблеме: при введении нового атрибута возникает вопрос о его принадлежности конкретной сущности. В предметной области может не существовать привязки атрибута к сущности, либо может наблюдаться многократное вхождение атрибута в различные сущности, в том числе не принадлежащие одной иерархии наследования. В этом случае функциональные зависимости [3] могут дать решения, приемлемые для внутреннего или физического, но не для концептуального уровня (модель ANSI/SPARC). Множественное наследование (в том виде, как оно существует в языках Java, C++) – один из вариантов решения данной проблемы, но он также несёт ограничения. Предлагаемый подход, более похожий в этом смысле на ортогональное проектирование структур реляционных баз данных, снимает проблему, так как позволяет конструировать собственные метамодели данных с любыми правилами распределения атрибутов по сущностям.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Для раскрытия сущности подхода рассмотрим, как на его основе можно представить объектно-ориентированную модель данных в виде наиболее важных общих моментов, подразумеваемых языком UML [9] и стандартами OMG [3].

Сначала определим исходный атрибут (формула 2.1). Для идентификации атрибута введем уникальное имя. Вхождение этого имени в выражения указывает на присутствие экземпляра атрибута с конкретным значением. Атрибут имеет базовый тип, которым может являться элементарный тип или множество уже определённых атрибутов (и то и другое формирует набор ограничений). Атрибут имеет семантику, в качестве которой здесь будем использовать выражения на формальном языке. Здесь и далее, при определении семантики предположим, что у нас определены используемые операции (is, >, <, in); многоточие будем

употреблять для обозначения возможного наличия других, менее важных правил или элементов; для обращения к элементам определения атрибута будем использовать точечную нотацию. Все вводимые понятия будем описывать на основе исчисления предикатов первого порядка, в виде, похожем на реляционное исчисление доменов (РИД) [3,стр.97] в том смысле, что все переменные определены как атрибуты (прямая аналогия с доменами) и конструкции строятся с использованием исчисления предикатов первого порядка.

$$\begin{aligned}
 a_s &= \langle 'n'; T_{basic}; S \rangle, \\
 T_{basic} &= \{t\} \cup \{a_s\}, \\
 \{t\} & - \text{множество элементарных типов}, \\
 \{a_s\} & - \text{множество уже определённых атрибутов}, \\
 n & - \text{уникальное имя атрибута}, \\
 S & - \text{множество правил, выражающих семантику}.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Для определения объектно-ориентированной модели данных введём понятие «модельный атрибут», который в дополнение к элементам базового атрибута включает два предопределённых базовых атрибута «classname» и «publicity». Первый – для определения класса, которому принадлежит атрибут, второй – для определения видимости атрибута.

$\exists a_s \langle 'classname'; string; \{value\ is\ identifier; value\ is\ unique; \dots\} \rangle$

$\exists a_s \langle 'publicity'; integer; \{value \geq 0; value\ in\ \{\dots \langle 'private' \langle 'protected' \langle 'public' \langle \dots \}; \dots\} \rangle$

$a_m = \langle a_s; classname; publicity \rangle$

Видимость («publicity») атрибута будем представлять с помощью элементов множества {«private», «protected», «public»} между которыми определены отношения порядка. Семантику данного свойства атрибутов раскроем далее, при определении допустимых множеств атрибутов и операций для классов.

Второй основной элемент ОО модели, который во многом определяет семантику модели – операции. Следует различать операции класса и операции объекта, здесь рассмотрим только операции объектов. Фактически определение операции происходит через её тело – набор операторов, однако, с точки зрения модели, тело операции не имеет значения. Операцию можно представить как функцию, которая имеет вход, результат и сторонний эффект. Каждую категорию можно представить множеством модельных атрибутов. Более детально: явный и неявный вход, явный и неявный выход: явные множества атрибутов (A_{inp}, A_{side}) при определении операции связываются с конкретными экземплярами атрибутов, в то время как неявные множества (A'_{inp}, A'_{out}) связываются только в момент вызова операции с передачей параметров. Операция так же, как и модельный атрибут, имеет свойства «classname» и «publicity» с той же семантикой.

$op = \langle A_{inp}; A'_{inp}; A_{side}; A'_{out}; classname; publicity \rangle,$

$A_{inp}, A'_{inp}, A_{side}, A'_{out} = \{a_m\}$

Заметим, что операция дополнительно характеризуется именем, уникальным в рамках иерархии наследования классов, которым она принадлежит.

Следующий элемент модели – связи между классами. В терминах атрибутов любую связь, возникающую между классами в ОО языках, можно представить через связь, связывающую 2 класса с ограничением на видимость атрибутов связанного класса. Кроме этого, связь имеет ограничение на существование связанных элементов – кардинальность связи. Взаимная видимость определяется типом связи, кардинальность – также зависящая от типа величина, однако она в общем случае не может быть определена чётко. Можно показать, что все типы связей, используемые в структурных диаграммах UML (наследование, ассоциация, агрегирование, композиция, зависимость и вложенные классы), могут быть выражены через взаимную видимость и кардинальность. Определим дополнительные базовые атрибуты: «visibility» на основе атрибута «publicity», «contype» на основе пары

атрибутов «visibility» и «cardinality» на основе атрибутов «card_range_bound» и «range_expression».

$$\begin{aligned} & \exists a_s < 'visibility'; publicity; \{ \dots \} > \\ & \exists a_s < 'contype'; < visibility_1; visibility_2 >; \{ \dots \} > \\ & \exists a_s < 'card_range_bound'; \{ char; integer \}; \{ value\ is\ integer\ or\ value = '*'; \dots \} > \\ & \exists a_s < 'range_expression'; < card_range_bound_1; card_range_bound_2 >; \\ & \quad \{ card_range_bound_1 \leq card_range_bound_2; \dots \} > \\ & \exists a_s < 'cardinality'; range_expression; \{ \dots \} > \\ & con = < classname_1; classname_2; cardinality_1; cardinality_2; contype; > \end{aligned}$$

Классы определяются через атрибуты, операции и связи, в которых они участвуют. Для классов определены доступные атрибуты и операции, что отличает правильно построенные модели от возможных. Т.е. доступность необходимых атрибутов и операций является критерием корректности для объектно-ориентированных моделей, создаваемых на основе предлагаемого подхода. Доступные атрибуты и операции класса складываются из собственных, доступных через «исходящие» и «входящие» связи.

$$\begin{aligned} A_{access}(classname) &= (a_m \mid a_m.classname = classname) \cup \\ & \cup (a_m \mid \exists con(con.classname_1 = classname \& \\ & \quad \& a_m \in A_{access}(con.classname_2) \& a_m.publicity \geq con.contype.visibility_2)) \cup \\ & \cup (a_m \mid \exists con(con.classname_2 = classname \& \\ & \quad \& a_m \in A_{access}(con.classname_1) \& a_m.publicity \geq con.contype.visibility_1)) \\ Op_{access}(classname) &= (op \mid op.classname = classname \& \\ & \quad \& op.A_{inp} \in A_{access}(classname) \& op.A_{side} \in A_{access}(classname)) \cup \\ & \cup (op \mid \exists con(con.classname_1 = classname \& \\ & \quad \& op \in Op_{access}(con.classname_2) \& op.publicity \geq con.contype.visibility_2)) \cup \\ & \cup (op \mid \exists con(con.classname_2 = classname \& \\ & \quad \& op \in Op_{access}(con.classname_1) \& op.publicity \geq con.contype.visibility_1)) \\ class &= < classname; \\ & \quad \{ a_m \mid a_m \in A_{access}(classname) \}; \\ & \quad \{ op \mid op \in Op_{access}(classname) \}; \\ & \quad \{ con \mid con.classname_1 = classname \vee con.classname_2 = classname \} > \end{aligned}$$

Теперь для окончательного определения модели достаточно задать конкретные значения атрибутов «contype» для определения конкретных видов связей. Таким образом, показаны основные черты ОО модели данных, выраженные через понятие атрибута. Можно заметить, что данные определения похожи на представление данных при компиляции ОО программы, где абстракции ОО модели выражаются через элементы данных, которыми может оперировать вычислительная машина.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

Покажем, как можно создать модель предметной области на основе предложенного подхода. Сначала по аналогии с вышеприведённым описанием определим каркас – модель данных. Затем расширим её в соответствии с предложениями, данными в [1], после чего приведём фрагмент концептуальной схемы системы ТПП ВП и опишем его с использованием введённых определений.

Основным элементом модели будут сущности, определённые на основе атрибутов, операций и связей. Аналогично ОО модели данных введём понятие модельного атрибута, расширяющего базовый атрибут. Однако в данном случае разрешим атрибуту принадлежать нескольким сущностям, для чего вместо атрибутов *classname* и *publicity* введём множество пар соответствующих значений, т.к. один и тот же атрибут может принадлежать различным сущностям с различной видимостью.

$$\begin{aligned} & \exists a_s < 'entityname'; string; \{ value\ is\ identifier; value\ is\ unique; \dots \} > \\ & \exists a_s < 'publicity'; integer; \{ value \geq 0; \\ & \quad value\ in\ \{ \dots < 'private' < 'protected' < 'public' < \dots \}; \dots \} > \\ & \exists a_s = < 'atrprop', < entityname; publicity >; \{ \dots \} > \\ & a_m = < a_s; A_{props} >, \\ & \quad A_{props} = \{ atrprop \} \end{aligned}$$

Определение операции оставим без изменений по сравнению с вышеприведённым.

Понятие связи расширим по сравнению с предложенным для ОО модели: будем указывать ограничения, в соответствии с которыми одни связи могут запрещать наличие других (например, можно поставить под сомнение существование двунаправленной агрегации между двумя сущностями). Эти ограничения («conconstraintexpr») могут быть выражены либо через запрещение множества видов связей в обоих направлениях между сущностями, участвующими в связи (*C1restr*, *C2restr*), либо явно, через запрещение наличия определённых атрибутов в сущностях (*A1restr*, *A2restr*), также в обе стороны. Для упрощения предположим, что степень связи всегда равна 2. Предполагая наличие определённых выше базовых атрибутов «visibility», «contype», «cardinality», дадим следующее определение:

$$\begin{aligned} con = & < entityname_1; entityname_2; cardinality_1; cardinality_2; contype; \\ & C_{restr}^1; C_{restr}^2; A_{restr}^1; A_{restr}^2 >, \\ & C_{restr}^1, C_{restr}^2 = \{ contype \}; A_{restr}^1, A_{restr}^2 = \{ a_m \} \end{aligned}$$

Главным понятием модели является сущность. Сущность идентифицируется именем, содержит набор атрибутов, операций и определяет множество связей, в которых участвует. В отличие от ОО модели, для определения сущности дополнительно введём понятие допустимых связей между сущностями. Определение допустимых связей основывается на ограничениях между ними и включает исходящие и входящие связи.

$$\begin{aligned} Con_{access}(entityname) = & (con \mid entityname = con.entityname_1 \ \& \\ & \ \& \ \exists rcon(entityname = rcon.entityname_1 \ \& \ con \ \< \ rcon \ \& \ con.contype \ \in \ conr.C_{restr}^1)) \cup \\ & \cup (con \mid entityname = con.entityname_2 \ \& \\ & \ \& \ \exists rcon(entityname = rcon.entityname_2 \ \& \ con \ \< \ rcon \ \& \ con.contype \ \in \ conr.C_{restr}^2)) \end{aligned}$$

Аналогично ОО модели, определяются допустимые атрибуты и операции для сущности правильно построенной модели. Для нахождения множества допустимых атрибутов сущности учитывается, что атрибут входит в различные сущности с различной видимостью и атрибут не должен быть запрещён ни одной связью. Из-за ограничений на размер работы дадим только конечное определение сущности:

$$\begin{aligned} entity = & < entityname; \{ a_m \mid a_m \ \in \ A_{access}(entity) \}, \\ & \{ op \mid op \ \in \ Op_{access}(entity) \}, \{ con \mid con \ \in \ Con_{access}(entity) \} > \end{aligned}$$

Аналогично ОО модели, для настройки модели нужно указать конкретные типы связей, создав экземпляры атрибутов «contype».

Расширим модель введением связей, предложенных в [1]. Первой была предложена связь, обозначающая вызов одной операцией набора доступных ей операций («callcon»). В

терминах атрибутов для каждой вызываемой операции должны быть известны все используемые множества атрибутов. По сравнению с введённым выше понятием операции, необходимо ввести множество локальных атрибутов операции, которые могут передаваться в вызываемую операцию из данной. В общем случае атрибуты могут определяться по ходу операции (например, локальные переменные цикла). Для упрощения будем считать, что все локальные для операции атрибуты вводятся одновременно до выполнения первого оператора операции. При развитии подхода уместно введение понятия «контекст вызова».

$$\begin{aligned}
 op_{ex} = & \langle op; A_{loc} \rangle, \quad A_{loc} = \{a_m\} \\
 callcon = & \langle op_{ex}; \{op\} \rangle, \forall !op \mid op \in Op_{access}(op_{ex}.entityname) \& \\
 & \& op.A_{inp}, op.A_{side} \subseteq A_{access}(op_{ex}.entityname) \cup A_{access}(op.entityname) \& \\
 & \& op.A'_{inp}, op.A'_{out} \subseteq A_{access}(op_{ex}.entityname) \cup A_{access}(op.entityname) \cup op_{ex}.A_{loc}
 \end{aligned}$$

Второй была предложена связь, обозначающая порождение и владение объектами, в результате выполнения операции: создаётся экземпляр сущности, владельцем которого становится, в общем случае, другая сущность (доступная операции). Для определения данной связи («createowncon») понадобятся новые понятия – доступные сущности для операции и доступные сущности для сущности.

$$\begin{aligned}
 E_{access}(op) = & (entityname \mid \exists op \in Op_{access}(entityname) \& op.entityname = entityname) \\
 E_{access}(entityname) = & entityname \cup \\
 & \cup con.entityname_2 \mid \exists con \in Con_{access}(entityname) \& con.entityname_1 = entityname \cup \\
 & \cup con.entityname_1 \mid \exists con \in Con_{access}(entityname) \& con.entityname_2 = entityname \\
 createowncon = & \langle op, e_{owner}, e_{new} \rangle, \\
 & e_{owner} \in E_{access}(op), \\
 & e_{new} \in E_{access}(e_{owner})
 \end{aligned}$$

Как можно заметить, вводимые связи не могут быть выражены через видимость и кардинальность, в отличие от ОО модели, что говорит об их смысловой нагрузке.

Теперь, когда у нас определён каркас модели в виде метамодели данных, рассмотрим фрагмент концептуальной схемы структур данных системы ТПП ВП. Детализируя сущности, выделенные нами в [1] и [4], используя нововведения из [1], построим фрагмент схемы на основе UML (рисунок 1). Для упрощения, приведены только некоторые атрибуты и операции и не соблюдена рекомендация из [1] о размещении элементов, связанных определёнными типами связей на отдельных диаграммах.

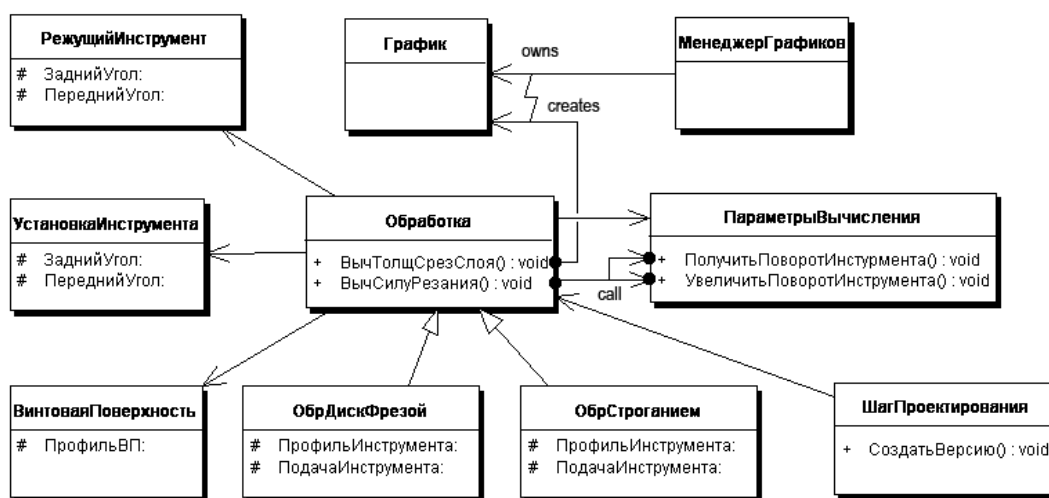


Рисунок 1 – Фрагмент концептуальной схемы структур данных системы ТПП ВП

Опишем данный фрагмент на основе данных выше определений. Во-первых, введём конкретные типы связей – наследование и направленную ассоциацию. Через двоеточие будем указывать, что именованный экземпляр определяется на основе указанного атрибута.

generalizaation : contype =< protected; public >

arrowedassoc : contype =< public; 0 >

Далее приведём примеры определения атрибутов и операций. Определяются одноимённые базовый и модельный атрибуты.

ЗаднийУгол : a_s =< 'ЗаднийУгол'; float; {value ≥ 0} >

ЗаднийУгол : a_m =< ЗаднийУгол; {< 'РежущийИнструмент', protected >, < 'УстановкаИнструмента', protected >}; {...} >

ВычСилуРезания : op =< {УстановкаИнструмента.ЗаднийУгол,...}, {...}, {...}, {...}, 'ВычСилуРезания', 'Обработка', public >

Приведём примеры определения связей и сущностей:

aacon₁ : con =< Обработка; Инструмент; 1; 1..; arrowedassoc; {}; {}; {}; {} >*

gencon₁ : con =< ОбрДискФрезой; Обработка0..; 1; arrowedassoc; {generalization}; {generalization}; {}; {} >*

Обработка : entity =< 'Обработка'; {...}; {ВычСилуРезания,...}; {aacon₁, gencon₁,...} >

callcon₁ : callcon =< Обработка.ВычСилуРезания; {ПараметрыВычислителя.ПолучитьПоворотИнструмента, ПараметрыВычислителя.УвеличитьПоворотИнструмента} >

coson₁ : createowncon =< Обработка.ВычТолицСрезСлоя, МенеджерГрафиков, График >

Таким образом, видим соответствие формальных определений и графической нотации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор атрибутов в качестве элементарных объектов моделирования, формальное описание подхода позволяют решить задачи, обозначенных в начале данной работы. Возвращаясь к работе [1], можно заметить, что изложенный подход позволяет реализовать предложения, сделанные в указанной работе.

В представленном виде подход требует доработки в отношении представления отличия между определениями атрибутов и модельных сущностей и их экземплярами. Это заметно из определений, связанных с операциями: определение доступных операций для сущностей, связи «callcon». Также требует проработки различие базовых и модельных атрибутов.

При развитии подхода следует по возможности реализовать такие требования, как: возможность проводить многоуровневую декомпозицию моделей, эквивалентные преобразования моделей, обеспечить повторное использование шаблонов проектирования, проверяемость моделей. Для создания моделей на основе предложенного подхода и использования преимуществ MDD, требуется создать каркас для создания и интерпретации моделей, который должен обеспечивать доступность семантики атрибутов на всех уровнях ПС – от хранения данных до представления их в пользовательском интерфейсе.

Продолжая исследования, целесообразно выполнить детальную проработку концептуальной схемы структур данных системы ТПП ВП на основе предложенного в данной работе подхода с целью развития и уточнения предложенного подхода и создания на

его основе полнофункционального специализированного языка проектирования. После этого станет возможным создание каркаса системы для интерпретации моделей, выраженных на указанном языке, то есть реализация системы ТПП ВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правдин, А.Л. Выбор модели данных для задачи технологической подготовки производства винтовых поверхностей [Текст] / А.Л. Правдин // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП)». – Орёл: изд-во ОрёлГТУ, 2008, Том 2. – С. 214-219
2. Patterns: Model-Driven Development Using IBM Rational Software Architect [Текст] // Режим доступа: URL: <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg247105.pdf>
3. Кузнецов, С.Д. Базы данных: языки и модели [Текст] / С.Д. Кузнецов // Учебник – М.: ООО «Бином-Пресс», 2008 г. – 720 с.:ил. ISBN 978-5-9518-0132-6
4. Правдин, А.Л. Анализ требований к интерактивной подсистеме АСТПП расчёта технологических параметров лезвийной обработки винтовых поверхностей [Текст] / А.Л. Правдин, С.И. Брусов // Известия ОрёлГТУ: в сфере «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии». - 2007.-№ 4/268(535), Орёл: изд-во ОрёлГТУ, – С. 72-82.
5. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных, 7-е издание [Текст] // Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 1072 с.: ил. – Парал. Тит. англ. ISBN 5-8459-0138-3 (рус.)
6. Евгений Григорьев Модель «объект-качество» [Текст] // Режим доступа: URL: <http://www.citforum.ru/database/articles/moq.shtml>, 2001 г.
7. Karsten Loer. Model-based Automated Analysis for the development of Dependable Interactive systems [Текст] // University of York, 2000 г., Режим доступа: URL: <http://citeseer.ist.psu.edu/loer00modelbased.html>
8. Basic Express Language Reference [Текст] // Режим доступа: URL: http://www.basicx.com/docs/zips/Language_Reference.pdf
9. Спецификация языка UML v.2.1.2 [Текст] // Режим доступа: URL: <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Infrastructure/PDF/>
10. About ORM [Текст] // Режим доступа: URL: <http://www.objectrolemodeling.com/AboutORM/tabid/34/Default.aspx>

Правдин Алексей Леонидович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Аспирант кафедры «Информационные системы»
Тел.: +7 (4862) 41-98-09
E-mail: pravdinalex@mail.ru



УДК 621.787.6

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, С.В. БАРИНОВ, С.А. СИЛАНТЬЕВ

**КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО
УПРОЧНЕНИЯ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Предложен новый способ повышения контактной выносливости деталей машин – статико-импульсная обработка, которая создает наклепанный поверхностный слой с высокой твердостью на большой глубине. Важной особенностью статико-импульсной обработки является возможность получения различной равномерности упрочненного поверхностного слоя. Проведены исследования влияния параметров упрочненного поверхностного слоя, полученного статико-импульсной обработкой на контактную выносливость, разработана методика исследований. В результате впервые получены рекомендации по равномерности деформационного упрочнения поверхностного слоя, способствующей повышению контактной выносливости деталей машин.

The new way of increasing of contact endurance of the part of machines – is static impulse processing which creates the riveted superficial layer with high hardness of the big depth is offered. The important feature of static impulse processing is the opportunity of receiving of the various uniformity of the strengthened superficial layer. The researches of influence of parameters of the strengthened superficial layer received by static impulse processing on the contact endurance are carried out, the technique of researches is developed. For the first time as a result, the recommendations on the uniformity of the deformation hardening of the superficial layer, promoting the increase contact endurance of the details of the machines have been received.

Долговечность деталей машин обычно определяется состоянием их поверхностного слоя. Для зубчатых колес, подшипников качения, рельс и рельсовых колес, прокатных валков, толкателей кулачков, бойков, элементов червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, направляющих и шлицевых соединений с телами качения, обгонных роликовых муфт и т.д. контактная выносливость поверхностного слоя является одним из важных эксплуатационных свойств. В результате действия на поверхность таких деталей локальных циклических контактных нагрузок в поверхностном слое зарождаются микротрещины, которые в дальнейшем приводят к отслоению частиц металла и образованию на поверхности ямок (выкрашиваний). При достижении определенных размеров выкрашиваний и их количества дальнейшая эксплуатация детали становится невозможной.

Для повышения контактной выносливости существуют различные способы упрочнения: термообработка, химико-термическая обработка, нанесение покрытий, поверхностное пластическое деформирование (ППД), которые должны создавать поверхностный слой с большой твердостью и большой глубиной (1,5...2 мм и более), достаточной, чтобы исключить его деформацию и продавливание под влиянием циклической контактной нагрузки [1, 2].

Одним из перспективных направлений повышения контактной выносливости деталей машин является создание упрочненного поверхностного слоя с неравномерно упрочненной (гетерогенной) структурой, т.е. когда в результате упрочнения в поверхностном слое детали формируются чередующиеся участки высокой и низкой твердости. Преимуществом материалов с гетерогенной структурой при действии на них циклических контактных нагрузок является торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. Создание гетерогенной структуры удавалось лишь методами термической [3-5], химико-термической обработки [6-7] и нанесением покрытий [8]. Деформационное упрочнение для формирования гетерогенной структуры не применялось. Поэтому отсутствовали исследования равномерности упрочнения при ППД. В значительной степени это связано с тем, что чередующиеся твердые

и мягкие наклепанные участки с достаточной точностью могут быть созданы, например, обкатыванием, но только на небольшой глубине (не более 1,5...3 мм). Получение более глубокого упрочненного поверхностного слоя при обкатывании обычно связано с высокими энергетическими затратами процесса и с усложнением используемых для обработки приспособлений. Для получения большой глубины упрочнения энергетически более выгодны ударные способы ППД, такие как чеканка, однако при этом значительно снижается точность управления обработкой и, в конечном счете, результаты упрочнения, в том числе и равномерность, становятся менее предсказуемыми.

В настоящее время разработан новый способ ППД – статико-импульсная обработка (СИО), который позволяет получать наклепанный слой с большой глубиной h и степенью упрочнения ΔH (для стали 45 – $\Delta H = 60\%$, $h = 6...7$ мм; стали 110Г13Л – $\Delta H = 150\%$, $h = 8...10$ мм) и практически с любой равномерностью упрочнения [9, 10]. Технология СИО заключается в предварительном статическом и периодическом ударном (импульсном) воздействии инструментом на обрабатываемую поверхность. Упрочненный поверхностный слой формируется в результате последовательного нанесения на поверхность заготовки пластических отпечатков, которые являются следствием управляемого импульсного воздействия, статическая составляющая нагрузки предназначена для наиболее полного использования импульсной. Ударная система, генерирующая импульсы, рассчитана в соответствии с волновой теорией удара, что позволяет распределять энергию, расходуемую на пластическую деформацию, с высокой эффективностью и точностью. Равномерность упрочнения будет определять перекрытие пластических отпечатков. Для того чтобы связать перекрытие отпечатков с режимами обработки, было введено понятие коэффициента перекрытия

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60}, \quad (1)$$

где s – скорость подачи, мм/мин; f – частота ударов, Гц; δ – размер пластического отпечатка, измеряемого в направлении подачи, мм.

Таким образом, если $K = 0$, т.е. $x = \delta$ (где x – когда расстояние между центрами отпечатков) – край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, когда $x < \delta$ – отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место.

В результате установлено, что при $0 \leq K \leq 0,5$ формируется явно выраженная гетерогенная структура с чередующимися твердыми и мягкими участками упрочненного поверхностного слоя. При $0,5 < K < 0,8$ ближе к поверхности формируется равномерно упрочненный слой, а неравномерно упрочненные участки смещаются вглубь. При режимах, когда $0,8 \leq K < 1$, формируется практически полностью равномерный упрочненный поверхностный слой и на самой поверхности появляются микротрещины, являющиеся результатом перенаклепа металла [9].

Для того чтобы установить влияние различной равномерности упрочнения ППД на контактную выносливость, были проведены экспериментальные исследования.

Для исследований разработан специальный стенд, который может устанавливаться на сверлильных или вертикально-фрезерных станках, предназначенный для испытаний на контактную выносливость поверхностей плоских образцов упрочненных СИО (рисунок 1). Стенд позволяет одновременно обкатывать две поверхности, на которых предварительно были нанесены упрочненные участки с различной равномерностью. Нижняя поверхность – пластина 5 – монтируется на столе станка, верхняя поверхность – пластина 2 – на державке 1, имеющей конус, с помощью которого она крепится в шпинделе станка. Пластина 2 поджимается к пластине 1 через шары 3, установленные в сепараторе 4. Шары располагаются в несколько рядов, что позволяет создавать на поверхности пластин одновременно несколько дорожек качения с различной окружной скоростью. Это дает возможность проследить, кроме прочих параметров, влияние на контактную выносливость проскальзывания при качении шаров (чем ближе шары располагаются к центру окружности, тем больше проскальзывание). Кроме того, на окружности качения устанавливается несколько шаров, что существенно уменьшает время испытаний и увеличивает равномерность нагружения. Число дорожек качения и количество шаров на окружности зависят от диаметра шаров.

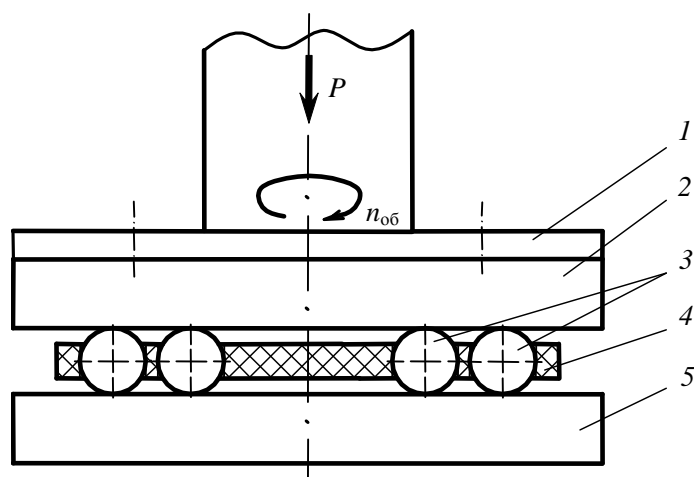


Рисунок 1 – Схема испытаний на контактную выносливость:

1 – державка, 2 – верхняя пластина, 3 – шары, 4 – сепаратор, 5 – нижняя пластина

В конструкции существует возможность убирать шары из одного или нескольких радиальных рядов, в ходе испытаний, если это необходимо, в случае достижения на данной дорожке качения критического износа. При этом испытания могут быть продолжены для других дорожек качения, где износ еще не достиг критического значения.

Для обеспечения равномерности зазора между верхней и нижней пластинами, перед началом испытаний осуществляется его контроль с помощью индикатора и регулирование.

Образцы для испытаний на контактную выносливость предварительно упрочняли СИО с режимами, обеспечивающими изменение коэффициента перекрытия в диапазоне $0 \leq K \leq 0,9$, при различных энергиях удара 56 Дж и 70 Дж, что позволило создавать различную глубину упрочненного поверхностного слоя. В качестве инструмента при упрочнении использовались стержневые ролики диаметром 10 мм и шириной 15 мм. Испытания проводились для каждого режима упрочнения СИО не менее чем на 10 образцах (для некоторых режимов 15...20 образцах).

На пластинах, где производилась СИО, особенно на режимах, обеспечивающих $K < 0,5$, поверхность имеет явные неровности в виде перекрывающихся вмятин. Для того чтобы уравнивать условия испытаний для всех участков упрочненной поверхности, полученных на различных режимах СИО, перед испытаниями поверхность пластины с упрочненными участками была предварительно отшлифована.

В качестве материала образцов применялась сталь 45 с пределом текучести $\sigma_T = 360$ МПа. Испытания проводились шарами $\varnothing 8,9$ мм и $\varnothing 19$ мм, что позволило проследить влияние на контактную выносливость площади контакта шара и испытываемой поверхности. Размер площади контакта рассчитывался в соответствии с теорией Герца, описывающей упругий контакт двух тел. Так, для шаров $\varnothing 8,9$ мм площадь контакта составила $0,088 \text{ мм}^2$, а для шаров $\varnothing 19$ мм – $0,191 \text{ мм}^2$. Нагрузка подбиралась таким образом, чтобы для шаров различных диаметров создаваемое контактное давление было одинаковым и не превышало предела текучести материала образцов. В результате во время испытаний шары воздействовали на поверхность образцов с давлением 340 МПа. Испытания проводились на базе 10^6 циклов, при частоте вращения шпинделя 200 об/мин, время испытаний составило 10,4 часа. В зону контакта шаров с испытываемой поверхностью осуществлялся регулярный подвод индустриального масла.

После прохода $0,05 \cdot 10^6$ циклов нагружения испытания останавливались и производился осмотр дорожек катания с целью выявления критического износа. Затем данные осмотры проводились каждые $0,1 \cdot 10^6$ циклов нагружения до достижения базового числа циклов. При достижении заданного числа циклов контактного нагружения, дорожки катания на упрочненной и неупрочненной поверхностях пластин подвергались лабораторным исследованиям с помощью большого инструментального микроскопа БМИ-1.

Образцы устанавливались на стол микроскопа БИМ-1 и фотографировались цифровым фотоаппаратом через его объектив при увеличении 1×50 с разрешением 7,1 Мпк. Полученные фотографии поверхности катания шаров заносили в персональный компьютер, где оценивались количество n (шт.) и площадь образовавшихся ямок (выкрашиваний) S (мм²), а также площадь образовавшейся в результате катания шаров дорожки S_d (мм²). Площадь измеренных выкрашиваний изменялась в диапазоне 0,0001...0,01 мм².

(Продолжение в № 4, 2008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А.В. Комплексное обеспечение качества несоосных винтовых механизмов и тяжело нагруженных резьбовых деталей [Текст] / А.В. Киричек. – М.: ИЦ МГТУ СТАНКИН, 2002. 242 с.
2. Аджиева, Т.Б. Определение параметров контактной усталости в поверхностно-упрочненных деталях [Текст] / Т.Б. Аджиева, М.Н. Георгиев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №7, 2006. т.72. С.49-51.
3. А.с. № 1782243. Способ термической обработки изделий / Чейлях А.П., Малинов Л.С. 1992.
4. Патент РФ № 2047661. Способ обработки резьбового изделия. / Аванесов В.С., Авербух Б.А., Ашигян Д.Г., Абубакиров А.В., Зейналов Р.Р., Гаджиев И.Ш., Прафененко С.Н., Будагов О.И., 1995.
5. Патент РФ 2219271. Способ упрочнения сплава на основе железа. / Дорофеев Г.А., 2003.
6. Иванов, Г.П., Картонова Л.В., Худошин А.А. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры [Текст] / Г.П. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худошин // Строительные и дорожные машины, 1997. № 1. С. 33-34.
7. Патент РФ 2090828. Противопульная гетерогенная броня из легированной стали для средств индивидуальной защиты и способ ее получения. Кирель Л.А., Михайлова О.М., Журавлев С.А., 1997.
8. Смелянский, В.М. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий [Текст] / В.М. Смелянский, В.А. Земсков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 27-35.
9. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004, 288 с.
10. Киричек, А.В. Равномерность наклепа после статико-импульсной обработки [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 8. С.3-5.
11. Головин, Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты [Текст] / Г.Ф. Головин. – Л.: Машиностроение, 1973. 144 с.

Киричек Андрей Викторович

Технологический институт Орловского государственного технического университета, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
302030, Орел, ул. Московская, 34
Тел.: 55-55-24
E-mail: ti@ostu.ru.

Соловьев Дмитрий Львович

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, г. Муром
Доктор технических наук, профессор
Тел.: (49234) 32022
E-mail: murstin@yandex.ru

Баринов Сергей Владимирович

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, г. Муром
Аспирант
Тел.: (49234) 32022
E-mail: murstin@yandex.ru

Силантьев Сергей Александрович

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, г. Муром
Кандидат технических наук, старший преподаватель
Тел.: (49234) 32022
E-mail: murstin@yandex.ru

УДК 621.357.7

Ю.Р. КОПЫЛОВ

К ПРОБЛЕМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ

В статье обосновывается актуальность толстослойного восстановления внутренних поверхностей деталей малой жесткости типа цилиндров гальвано-механическим осталиванием без термического воздействия, приведены некоторые экспериментальные результаты толстослойного восстановления (1-2 мм на сторону) тонкостенных цилиндрических образцов из стали 30, дается в качестве примера описание устройства для восстановления внутренних поверхностей.

In clause the urgency thick layer of smith course restoration of internal surfaces of details of small rigidity such as cylinders electrotype-mechanical deposit steel without thermal influence is proved, some experimental results restoration are resulted толстослойного (1-2 mm on the party) thin-walled cylindrical samples from steel 30, are given as an example the description of the device for restoration of internal surfaces.

Актуальность толстослойного восстановления внутренних изношенных поверхностей деталей малой жесткости типа цилиндров гидроагрегатов вызвана следующими факторами:

- короблением деталей при восстановлении с термическим воздействием и необходимостью в этой связи создания повышенных припусков для последующей механической обработки;
- трудностью ввода электрода-инструмента при наплавке, или струйного инструмента при детонационном напылении;
- низким качеством и малой прочностью сцепления восстановленного слоя. Помимо проблем размерного восстановления, возникают проблемы сохранения остаточной усталостной прочности и долговечности деталей.

Электро-гальванические методы восстановления не оказывают термического воздействия, поэтому коробление деталей минимально. В связи с экранированием катодной поверхности детали пузырьками молекулярного водорода, окислами и солями, процесс восстановления со временем замедляется. Проблемы экранирования катодной поверхности устраняются при восстановлении асимметричным током. Однако при толщине восстановленного слоя более 0,5-0,7 мм образуются значительные растягивающие напряжения, возникают трещины, поверхностный слой имеет значительную шероховатость $Rz\ 200-320\ \mu\text{м}$, содержит продукты окислов и включения водорода.

При гальвано-механическом осталивании детали, помещенной в электролит, сообщается вращательное движение, а выглаживающий инструмент прижимается к детали и совершает возвратно-поступательные перемещения [1]. Деталь подсоединяется к минусовому источнику постоянного тока, анода – к положительному. Использовался электролит на основе хлористого железа, кислотности $pH=1,0$. Плотность тока $25-80\ \text{А/дм}^2$. Подготовка образцов к покрытию проводится по известной технологии.

Деталь-образец вращается с частотой 60 об/мин. Частота продольных перемещений выглаживающего инструмента относительно детали составляет 40 двойных ходов в минуту. Давление инструмента на поверхность восстановленного слоя детали 0,3 МПа. Температура электролита в начальные $\tau=20$ мин остается постоянной $T_3 = 25^\circ\text{C}$, в последующем – слабо растет до $\approx 25^\circ\text{C}$. Ток в цепи питания незначительно растет в пределах $I_{\text{цп}} = 19,3 \div 22,5\ \text{А}$; напряжение $U_{\text{цп}}$ слабо падает с 35 до 27,4 В до $\tau=90$ мин. При плотности тока $I_k=80\ \text{А/дм}^2$ толщина восстановленного слоя растет в течении $\tau=120$ мин восстановления до 1,8 мм на сторону, соответственно увеличивается диаметр образца. Среднеарифметическое отклонение профиля микронеровностей восстановленного слоя, без последующей механической обработки, составляет $Ra\ 03-096\ \mu\text{м}$. Микротвердость восстановленного слоя по Виккерсу составляет $HV\ 550-765$. Остаточные напряжения в поверхностном слое: от

сжимающих $\sigma_{-o} = 6$ МПа, до растягивающих $\sigma_{+o} = 15$ МПа. Износостойкость от 50×10^{-6} до 50×10^{-6} кг/м³. Прочность сцепления от 5 до 24 МПа.

Пример конструктивного исполнения устройства для гальвано-механического восстановления внутренних поверхностей представлен на рисунке 1 [2].

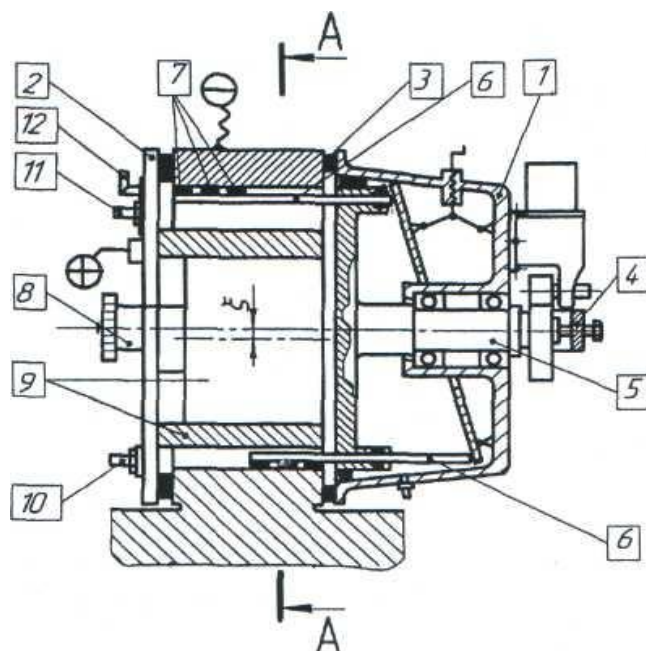


Рисунок 1 – Конструктивная схема устройства для гальваномеханического восстановления внутренних поверхностей

Устройство выполнено в виде емкости для электролита, представляющей собой два соосных корпусных фланца 1 и 2. Совместно с подлежащей восстановлению поверхностью детали за счет эластичного уплотнения 3 они образуют герметичную емкость. Фланцы 1 и 2 между собой связаны стяжными элементами 4. На фланце 1 закреплен вал 5, связанный тягами 6 с инструментом 7, предназначенным для удаления окислов, солей с 25 восстанавливаемой поверхности и пластического деформирования ее.

Вал 5 закреплен на фланце 1 соосно с действительной осью обрабатываемой детали. На фланце 2 с возможностью поворота за счет механизма 8 закреплен анод 9 с эксцентриситетом относительно оси вала 5 или что тоже относительно оси обрабатываемой детали. Величина эксцентриситета зависит от величины изношенного участка поверхности детали. Во фланце 2 предусмотрен штуцер 10 для подачи электролита, штуцер 11 для слива его и для стравливания образующегося в процессе нанесения покрытия водорода – штуцер 12.

Предлагаемая конструкция емкости для электролита обеспечивает минимальные размеры устройства, при желании, – в силу этого его транспортировку, и удовлетворяет требованиям экологичности процесса ввиду его замкнутости.

Размещение в данном устройстве инструмента для пластического деформирования и анода позволяет наносить электролитическое покрытие максимально на изношенную поверхность и минимально на поверхность, не подвергнутую износу. Расположенный соосно с действительной осью детали инструмент для пластического деформирования позволяет также добиться номинальной конфигурации отверстия [3].

Процесс восстановления детали осуществляется следующим образом: после подготовки поверхности детали (очистка, обезжиривание по известной технологии) проводят размерную диагностику поверхности.

В зависимости от величины изношенности участка поверхности изменяют эксцентриситет путем поворота анода 9 на требуемый угол механизмом 8.

Определяют необходимую величину давления инструмента 7 для пластического деформирования, а также необходимую частоту и амплитуду перемещения его. Производят сборку устройства, обращая особое внимание на герметичность соединения фланцев 1 и 2

относительно детали. Через штуцер 10 осуществляют подачу электролита, а через штуцер 11 – его слив. Подают команду на перемещение инструмента 7 и напряжение на анод 9.

Время нанесения покрытия в зависимости от степени изношенности поверхности и с учетом припуска под шлифование определяем по номограмме, построенной по результатам опытной отработки технологии. В процессе восстановления детали контролируется ток, напряжение, температура и кислотность электролита.

В процессе электролитического покрытия за счет эксцентриситета покрытие наиболее интенсивно будет происходить при минимальном расстоянии между анодом и участком обрабатываемой поверхности, то есть над участком изношенной поверхности. Над участками поверхности, более удаленными от анода, нанесение покрытия будет происходить менее интенсивно, пропорционально степени удаленности анода от поверхности. Инструмент для пластического деформирования будет нивелировать эту разницу до получения требуемого диаметра отверстия. Возможно осуществление процесса восстановления одновременно на нескольких ступенчатых поверхностях.

Инструмент при возвратно-поступательном движении имеет на всем протяжении детали не одинаковую линейную скорость перемещения. Она максимальна в средней части амплитуды перемещения, минимальна в начале и конце ее. Это приводит к тому, что там, где скорость инструмента минимальна, осаждается слой большей толщины, чем на участке детали с максимальной скоростью перемещения. Изменение расстояния между следами носит синусоидальный характер. Поэтому для полного перекрытия восстанавливаемой поверхности следами упруго-пластического воздействия инструмента, максимальное расстояние между соседними следами должно быть меньше или равно длине линии контакта инструмента, что достигается регулировкой соотношения частот вращения кривошипа и детали.

Устройство для гальвано-механического восстановления токопроводящих деталей, преимущественно внутренних поверхностей разъемных цилиндрических изделий, содержащее емкость для электролита, анод и инструмент для пластического деформирования поверхности детали, отличается от существующих тем, что емкость для электролита представляет собой два соосных корпусных фланца, выполненных с возможностью герметичного охвата полости подлежащей обработке детали и связанных между собой стяжными элементами, инструмент для пластического деформирования связан с валом, закрепленным на одном из фланцев, соосно с действительной осью подлежащей обработке детали, а анод, ось которого эксцентрична относительно оси вала, смонтирован на противоположном фланце с возможностью поворота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов, Ю.Р. Гальвано-механическое восстановление шеек крупногабаритных коленчатых валов. Материалы всероссийской научно-методической конференции. «Основы проектирования и детали машин [Текст] / Ю.Р. Копылов. – XXI век». Орел. ОрГТУ. 2007. С. 336-340.
2. Патент 2296822 RU C1, МПК C25D 5/22, C25D 7/04. Устройство для гальвано-механического восстановления токопроводящих деталей. Ю.Р. Копылов, А.Ю. Копылов.
3. Патент 2296823 RU C1, МПК C25D 5/22, C25D 7/04. Устройство для гальвано-механического восстановления токопроводящих деталей. Ю.Р. Копылов, А.Ю. Копылов.

Копылов Юрий Романович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Тел. (8732) 930929

Факс (8732) 702720

E-mail: urkopulov@mail.ru

В.П. КОРЯЧКИН

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СПЛОШНЫХ СРЕД

Разработана концепция деформационного поведения сплошных сред, заключающаяся в том, что на их сдвиговое течение влияет соотношение упругих и пластических свойств, которое при прочих равных условиях является функцией скорости сдвига. Анализ кривых течения широкого спектра сплошных сред позволил предложить характерные реологические уравнения состояния, которые позволяют оценить соотношение упругих и пластических свойств объектов исследования. Предложены схемы полных кривых течения твердообразных сред, обладающих пластическими свойствами.

The concept of deformation behaviour of the continuous environments, consisting that their shift current is influenced with a parity of elastic and plastic properties which with other things being equal is function of speed of shift is developed. The analysis of curves of current of a wide spectrum of continuous environments has allowed to offer characteristic реологические the equations of a condition which allow to estimate a parity of elastic and plastic properties of objects of research. Circuits of full curves of current твердообразных the environments possessing plastic properties are offered.

Современными технологиями поточного производства продукции в различных отраслях промышленности перерабатывается широкий спектр пластичных сплошных сред.

К пластичным средам относятся такие, у которых упругие деформации пренебрежимо малы [1]. Однако именно упругие деформации оказывают существенное влияние на характер деформационного поведения тиксотропных пластичных дисперсных сред, что обуславливает особенность их сдвигового течения в сквозных каналах измерительных приборов и технологического оборудования.

Особенностью сплошных сред, обладающих пластическими свойствами, является то, что их сдвиговое течение характеризуется соотношением упругости и пластичности, количественная величина которого изменяется в зависимости от скорости сдвига.

Графики кривых течения различных сплошных сред, получаемые в широком диапазоне скоростей сдвига, как правило, не только нелинейные, но и имеют кривизну разного направления. При этом выпуклость участка графика кривой течения может быть обращена к оси касательного напряжения или к оси скорости сдвига.

Участки нелинейных графиков кривых течения сплошных сред, обладающих пластическими свойствами, в логарифмических координатах $\lg \dot{\theta} = \lg \theta (\lg \dot{\gamma})$, обращенные к разным осям координат, разделяются точкой смены направления кривизны графиков, так называемыми точками перегиба.

На рисунке 1 представлены схемы характерных графиков кривых течения сплошных сред, обладающих пластическими свойствами, изображенные в безразмерных координатах с точками перегиба А и В, в которых происходит смена направления кривизны графиков $\lg \dot{\theta} = \lg \theta (\lg \dot{\gamma})$.

Из рисунка 1 видно, что с увеличением скорости сдвига $\dot{\gamma}$ направление выпуклости графика кривой течения (1) в точке А(20, 8) изменяется с направления к оси $\lg \dot{\theta}$ на направление к оси $\lg \dot{\gamma}$. А направление выпуклости графика кривой течения (2) изменяется в точке В(20, 3) в обратной последовательности, то есть с направления к оси $\lg \dot{\gamma}$ на направление к оси $\lg \dot{\theta}$.

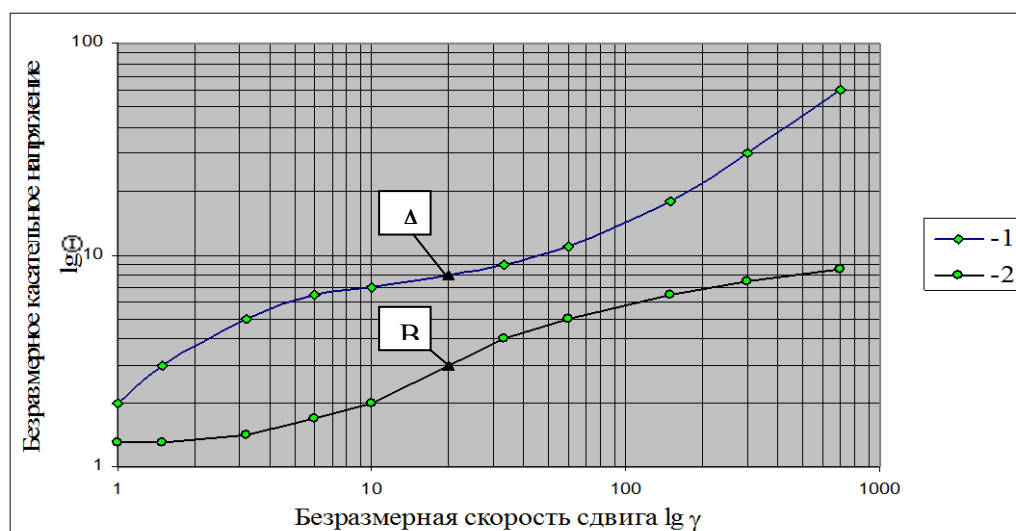


Рисунок 1 – Схемы графиков кривых течения в логарифмических координатах

Для обозначения направления кривизны участков графиков кривых течения $\lg \theta = \lg \theta(\lg \dot{\gamma})$ введем знаки «+» и «-». При этом, если кривая течения обращена выпуклостью к оси $\lg \dot{\gamma}$, ей присваивают знак «+», а если кривая течения обращена выпуклостью к оси $\lg \theta$ – знак «-». Эти же знаки следует учитывать при написании реологических уравнений состояния пластичных материалов, проставляя их перед основной реологической характеристикой пластичных материалов – предельным напряжением сдвига θ_0 , поскольку на кривизну зависимостей касательного напряжения от скорости сдвига в логарифмических координатах влияет θ_0 .

Если в реологические уравнения состояния входят символы предельного напряжения сдвига θ_0 со знаками $\pm \theta_0$ и $\mp \theta_0$, то это означает следующее. Данные реологические уравнения состояния соответственно описывают кривые течения пластичных сред с точкой перегиба, в которой изменяется направление выпуклости графика $\lg \theta = \lg \theta(\lg \dot{\gamma})$ от оси $\lg \dot{\gamma}$ к оси $\lg \theta$ и от оси $\lg \theta$ к оси $\lg \dot{\gamma}$, соответственно.

$$\theta = \frac{(\mp \theta_0)^2}{\theta} + K \dot{\gamma}^n ; \quad (1)$$

$$\theta = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} + K \dot{\gamma}^n . \quad (2)$$

Таким образом, из схемы графиков, представленной на рисунке 1, видно, что при малых скоростях сдвига на первой кривой течения до точки перегиба А и в области больших скоростей сдвига на второй кривой течения после точки перегиба В преобладают упругие свойства над пластическими. При этом в области больших скоростей сдвига на первой кривой течения после точки перегиба А, а также при малых скоростях сдвига на второй кривой течения до точки В упругие свойства уступают пластическим.

На рисунках 2 и 3 представлены экспериментальные кривые течения полиэтилена [2], ацетат целлюлозы [3], консистентных смазок [4] и некоторых пищевых масс [5, 6, 7, 8], которые по характеру кривых течения относятся к первой или второй группам сплошных сред и могут быть описаны соответствующими реологическими уравнениями состояния (1) или (2).

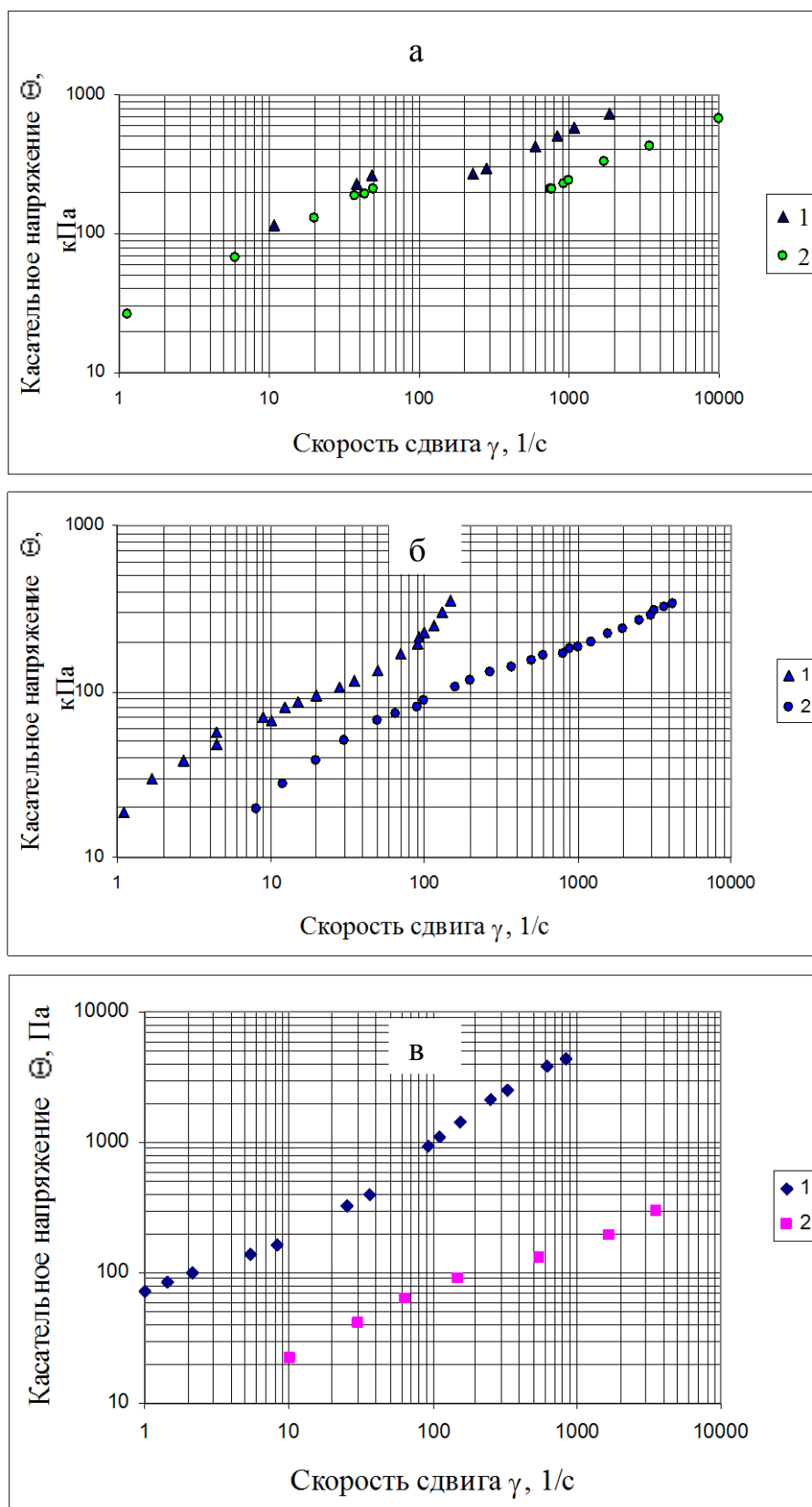


Рисунок 2 – Кривые течения:

а – линейного полиэтилена при отношении длины капилляра к диаметру: 1 – 3,65 и 2 – 16 (температура 152 °С) [2]; б – ацетат целлюлозы при температуре: 1 – 190 °С и 2 – 210 °С [3]; в 1 – смазки ГОИ – 54п при температуре 15°С и 2 – солидола жирового при температуре 20°С [4]

Переход кривизны графика кривой течения линейного полиэтилена через точку перегиба Торнер Р.В. [2] объяснил механизмом неустойчивого течения в капилляре в результате возникновения эластической деформации в пристенном слое.

Проведенные нами исследования (рисунок 3) сдвигового течения некоторых пищевых сред методами ротационной и капиллярной вискозиметрии показали, что их кривые течения имеют аналогичные графики кривых течения и могут быть с высокой точностью, соизмеримой с погрешностью приборов, описаны уравнениями (1) и (2).

На рисунке 3 представлены кривые течения $\lg \theta = \lg \theta(\lg \dot{\gamma})$ песочного теста из пшеничной муки, не имеющей упругого клейковинного каркаса, и смеси пшеничной муки с пшеничной мукой.

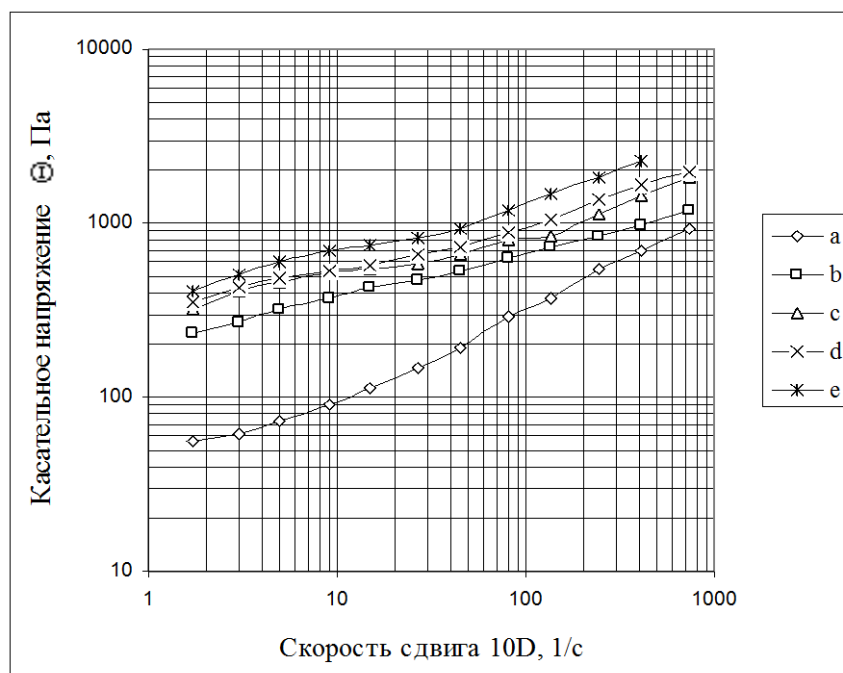


Рисунок 3 – Кривые течения песочного теста из пшеничной муки и смеси пшеничной муки с пшеничной мукой: а – 100% пшеничной, б – 75% пшеничной и 25% пшеничной, с – 50% пшеничной и 50% пшеничной, d – 25% пшеничной и 75% пшеничной и e – 100% пшеничной муки (контроль)

Кривые течения 1 (рисунок 2в), включая кривую течения «е» на рисунке 3, в области малых значений скорости сдвига обращены выпуклостью к оси скорости сдвига. С ростом скорости сдвига кривизна графика меняется на противоположное направление. Такая очередность знаков у символа предельного напряжения сдвига ($\pm \theta_0$) в реологическом уравнении состояния указывает на преобладание пластических свойств, проявляемых средой при течении в диапазоне малых значений скорости сдвига. С ростом скорости сдвига пластично-вязкое течение среды меняется на упруго-вязкое с отрицательным значением предельного напряжения сдвига, что говорит о превосходящих упругих свойствах, проявляемых средой в области высоких скоростей сдвига.

Исследования показали, что с повышением влияния упругого клейковинного каркаса в тесте происходит изменение реологических уравнений состояния песочного теста со (2) на (1) согласно изменению кривизны графиков $\lg \theta = \lg \theta(\lg \dot{\gamma})$, вид которых определяется соотношением упругих и пластических свойств образцов.

На рисунках 4 и 5 приведены схемы кривых течения, изображенные в прямоугольной декартовой системе координат и относящиеся к первой и второй группам, что соответствует реологическим уравнениям состояния (1) и (2). Из рисунков 4 и 5 очевидно пояснение знаков «+» и «-» перед символом предельного напряжения сдвига.

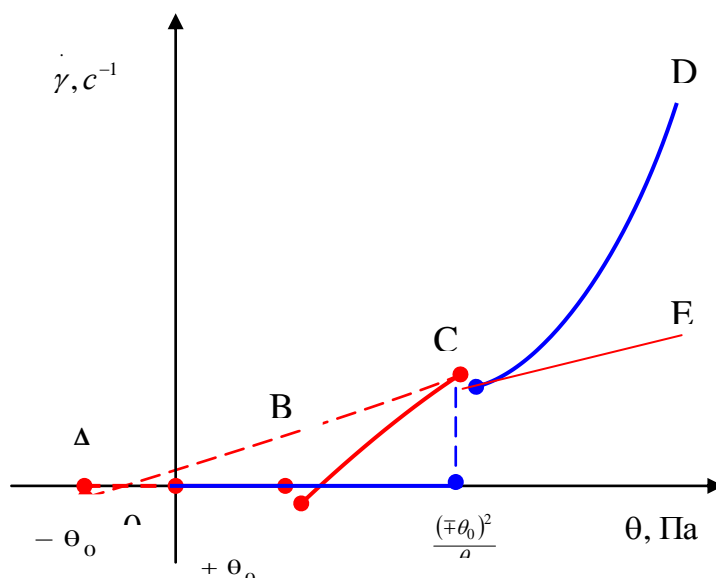


Рисунок 4 – Схема кривой течения упруго - вязко - пластичной среды

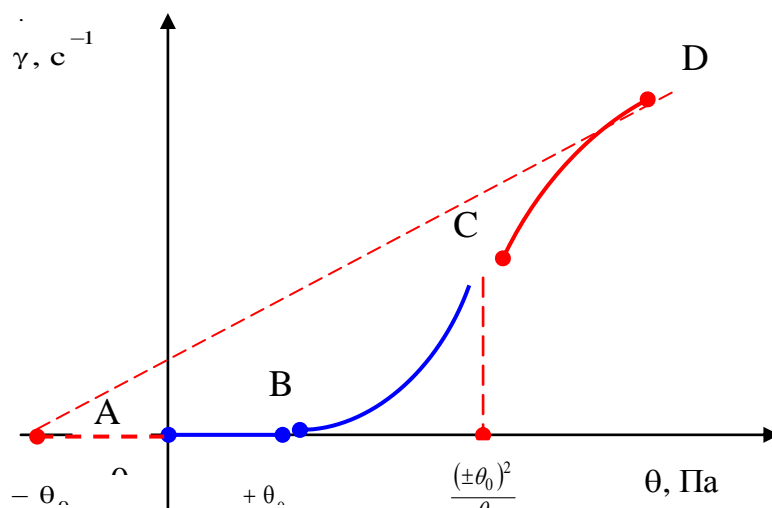


Рисунок 5 – Схема кривой течения пластично - вязко - упругой среды

ЛИТЕРАТУРА

1. Тябин, Н.В. Реологическая кибернетика, часть 1 [Текст] / Н.В. Тябин. – Волгоград.: Волгоградская правда, 1977. - 111 с.
2. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 462 с.
3. Бернхард, Э. Переработка термопластичных материалов [Текст] / Э. Бернхард. – М.: Химия, 1965.
4. Фройштетер, Г.Б. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок [Текст] / Г.Б. Фройштетер, К.К. Трильский, Ю.Л. Ищук, П.М. Ступак. – М.: Химия, 1980. – 175 с.
5. Корячкин, В.П. Расчет параметров свойств пищевых систем [Текст] / В.П. Корячкин, В.Д. Ермолаев. – Кемерово.: ЦНТИ, 1982. - № 297. - 3 с.
6. Корячкин, В.П. Комплект макетов устройств для анализа качества формирования кондитерских масс в изделия [Текст] / В.П. Корячкин, Ю.А. Мачихин // Новые методы контроля технологических процессов и качество продукции: Сборник научных трудов. – Новосибирск: СО РАСХН, 1991.
7. Корячкин, В.П. Установка для обработки пищевых сред давлением [Текст] / В.П. Корячкин // Индустрия образования: Сборник статей. Выпуск 3. – М: МГИУ, 2002. – С. 105 – 110.
8. Корячкин, В.П. Особенности стационарного течения сплошных пластических сред в сквозных каналах с учетом пристенного скольжения [Текст] / В.П. Корячкин // Современные наукоемкие технологии. – М: РАЕ, 2004, № 2, С 12 - 18.

Корячкин Владимир Петрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
 тел./fax(4862)551187
 E-mail: mapp@ostu.ru

УДК 621.774

В.Я. ОСАДЧИЙ, Д.А. КОВАЛЕВ, И.К. ТАРТАКОВСКИЙ,
Б.И. ТАРТАКОВСКИЙ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА МЕТОДАМИ ОМД

On the basis of the available investment projects analysis and comparative results of initial metal properties change during the process of helical rolling (HR) and equal – channel angular pressing (ECAP) the recommendations and proposals for innovation techniques and equipment are given for production of superfine-grained metal structure with methods of non-cutting shaping.

На основании анализа существующих инвестиционных проектов и сравнительных результатов изменения свойств исходного металла в процессе поперечно-винтовой прокатки (ПВП) и равноканального углового прессования (РКУ-прессование) даны рекомендации и предложения о создании инновационных технологий и оборудования для получения ультрамелкозернистой структуры металла методами ОМД.

Ещё 30-25 лет назад в нашей стране считалось, что машиностроение является стеновым хребтом нашей промышленности и экономики. Естественно, что «хлебом» машиностроения является металл – сталь, алюминий, медь, титан и т.д.

Однако качество металла (особенно стали, алюминиевых сплавов) за последние годы заметно ухудшилось.

В последнее время руководство страны несколько раз высказывалось о необходимости возрождения машиностроения, особенно аэрокосмического, атомного, оборонного, электронного приборостроения, металлургического и других направлений машиностроения, так как дела здесь обстоят крайне неудовлетворительно.

Следовательно, назрела необходимость вплотную заняться инновационными технологиями и созданием оборудования для существенного повышения качества металла.

В 2006 г. Россия произвела оборудования в целом в 82 раза меньше, чем Япония, в 50 раз меньше, чем Германия, в 31 раз меньше, чем Китай. Сегодня до 100% оборудования для механообработки закупается по импорту, создание новых мощностей и реконструкция старых осуществляется в металлургии на 60-70% по проектам и на оборудовании импортного производства. Доля наукоемкой продукции в нашей стране составляет, по разным данным, – 0,5-1,5%, а в США – 35%, в Японии – 30%, в Китае – 6%.

Поскольку наша кафедра и ЭЗТМ на протяжении многих лет связаны с металлургическим машиностроением и трубной промышленностью, необходимо очень кратко охарактеризовать положение дел именно здесь.

Конкуренция на мировом рынке трубной продукции всё в большей степени переходит в сферу научно-технологических разработок, создания новых видов продукции и соответствующего оборудования для производства продукции высокого качества и контроля над её качеством, а качество изделий напрямую зависит от качества металла.

Таблицы 1 и 2 характеризуют инвестиционные проекты по бесшовным сварным трубам на ближайшие 5 лет [1].

И только одну позицию мы видим здесь с участием Российского завода – ЭЗТМ и при участии нашей кафедры ТИ-2.

Благодаря новым разработкам по конструкциям прошивных станков и нашему информационному обеспечению, ЭЗТМ выиграл тендер у лучших фирм Германии и Италии, и мы вместе разработали и создали этот стан.

Таблица 1 – Инвестиционные проекты по строительству новых мощностей для производства труб нефтяного сортамента России

Компания	Содержание проекта	Поставщик оборудования	Новые вводимые мощности, тыс. т
ОАО «ТМК»	Стан PQF (Тагмет)	SMS Meer (Германия)	450
	Прошивной стан, непрерывный стан (СТЗ)	ЭЗТМ, SMS Meer (Германия)	170
	Линия нарезки (ВТЗ)	ITWH (Германия)	210
	3 термоотдела	Olivoto Ferre	700
ЗАО «Группа ЧТПЗ»	Финишный центр	SMS MEER, EMAG (Германия), Tuboscope (США)	115
	Стан PQF/FQM	Не определен	660

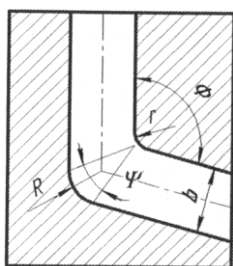
Таблица 2 – Инвестиционные проекты по строительству новых мощностей для производства труб большого диаметра в России

Компания	Содержание проекта	Поставщик оборудования	Новые вводимые мощности, тыс. т
ЗАО «ИТЗ»	ТЭСЦ 1420	SMS Meer (Германия)	600
ОАО «ОМК»	ТЭСЦ 1420	SMS Meer (Германия)	
	Линия покрытия	Bauhuis International B.V., (Голландия)	900
ЗАО «Группа ЧТПЗ»	ТЭСЦ № 6, Стан 1020-1220		350
	ТЭСЦ № 3	SMS Meer (Германия)	700
ОАО «ТМК»	ТЭСЦ 1420	HAEUSLER AG (Швейцария)	450

Суммарно металлурги и трубники за ближайшие 5 лет вложат в развитие производства около 24,1 млрд. евро и только 1,5-2,0 млрд. евро сможет освоить отечественное машиностроение, и то на второстепенное оборудование и конструкции в проектных разработках зарубежных компаний.

Когда мы (ЭЗТМ, МГУПИ и Северский трубный завод) приступили к разработке технического проекта нового прошивного суперстана, то мы базировались на работах, выполненных на кафедре ТИ-2 (Леняшин В.Б., Гетия И.Г., Шумилин В.К., Левшунов М.А., Емец В.Н., Бельмовский Н.А, Лапин Л.И. и др.) на разработанной нашим докторантом Пановым Е.И. [2] статической модели напряжённо-деформированного состояния металла на основе программы «Ansys» LSDyna, а также и на динамической модели на основе программы «DeForm», разработанной нашим аспирантом Ковалёвым Д.А.

Помимо силовых, скоростных, деформационных и конструктивных параметров нового стана, нас интересовал вопрос изменения свойств исходного металла в процессе поперечно-винтовой прокатки, в сравнении с равноканальным угловым прессованием (РКУ-прессованием), которое было предложено в 70-х годах прошлого столетия Сегалом В.М. и которое считалось одним из наиболее эффективных способов ОМД, где материал испытывает интенсивные пластические деформации при повороте очага деформации на 90°...60°.



На рисунке 1 представлена геометрия канала при РКУ-прессовании, а на рисунках 2 и 3 – заполнение очага деформации металлом, где видно, что происходит сдвиговая деформация при резком повороте металла.

Рисунок 1 – Геометрия канала при РКУ-прессовании

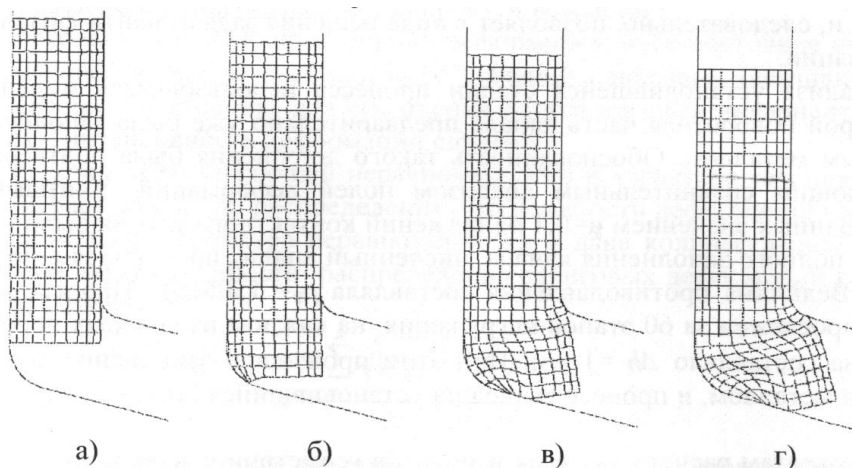


Рисунок 2 – Положение заготовки в канале при $\Phi=105^\circ$:

а) $\Delta h=0\text{мм}$; б) $\Delta h=8\text{мм}$; в) $\Delta h=13\text{мм}$; г) $\Delta h=18\text{мм}$

Однако характер течения металла по сечению заготовки неравномерен. Следствием неравномерности течения металла является неравномерность распределения интенсивности сдвиговых деформаций. Так, в прямоугольном канале ($\Phi = 90^\circ$) по данным Рыбина Ю.И. и Паршикова Р.А. [3] скорость течения для различных слоёв металла отличаются значительно (рисунок 4).

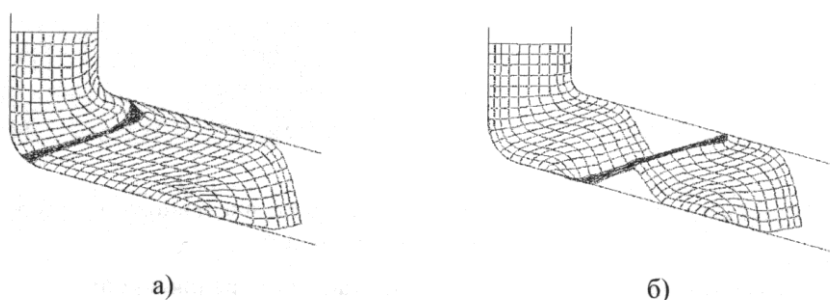


Рисунок 3 – Положение заготовок в канале при непрерывном РКУ- прессовании при различных условиях контактного трения: а) $\mu=0,3$; б) $\mu=0,15$

Как следствие, величины накопленных деформаций сдвига в разных частях заготовки различаются более чем в 2,5 раза. Это может привести к разрушению металла и обязательно приводит к разному размеру зерен металла и к неравномерности свойств металла.

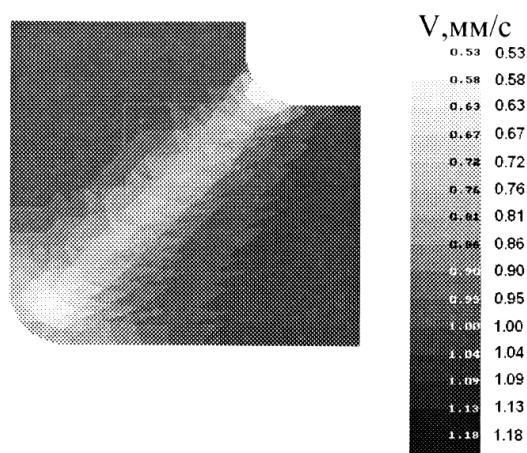


Рисунок 4 – Распределение скорости течения металла в продольной плоскости прямоугольного канала

При исходной структуре металла (алюминий А7) с размером зерна $\sim 150...180$ мкм после прессования за один проход в средней части образцов преобладают зерна с размером $\sim 60...80$ мкм. При смещении к краю в сторону внешнего радиуса размер зерен составляет $\sim 120...140$ мкм, а при смещении в сторону внутреннего радиуса размер зерен уменьшается до $\sim 50...70$ мкм. Опыты также показали, что после двух проходов для алюминия марки А7 увеличение количества проходов не приводит к уменьшению зерна и к упрочнению данного металла. Наступает эффект «насыщения» [3].

Поэтому РКУ-прессование при целом ряде положительных факторов имеет и ряд отрицательных моментов: низкую производительность, большой расходный коэффициент металла и др.

При поперечно-винтовой прокатке происходит более благоприятная деформация металла в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях, а также скручивание заготовки вокруг своей оси (работы Никулина А.Н., Потапова И.Н, Галкина А.П., Панова Е.И., Осадчего В.Я., Ковалёва Д.А.). Интенсивная поперечно-винтовая деформация приводит к заметной проработке металла и повышению его пластических свойств. Ещё 25 лет назад на ЧТПЗ в цехе №1, когда поступал ответственный заказ на определённые трубы, литой слиток после нагрева прокатывали в двухвалковом стане поперечно-винтовой прокатки, давая небольшое обжатие по диаметру (6...8%). Затем после повторного нагрева этот слиток прошивали в толстостенную гильзу, а её раскатывали на пилигримовом стане в тонкостенную трубу. Такие небольшие обжатия по диаметру связаны с наличием в цехе №1 ЧТПЗ только двухвалкового маломощного стана ПВП. Но даже эти небольшие обжатия давали положительные результаты по качеству труб.

Первым теоретически некоторые преимущества ПВП в трехвалковом стане убедительно показал в своей докторской диссертации Смирнов В.С. Экспериментально это положение удалось доказать Осадчему В.Я., осуществив впервые в стране на первом трехвалковом промышленном стане цеха №5 ПНТЗ прокатку заготовок из ст. 20, ШХ-15 и 35ХГСА с обжатием по диаметру от 5...25%. Результаты убедительно показали, что в двухвалковом стане происходит осевое разрушение заготовки при обжатии 8...12%, а в трёхвалковом стане осевое или кольцевое разрушение не происходит даже при обжатии в 25%.

На основании этих работ, а также исследований Тетерина П.К., Грановского С.П. и Целикова А.И., поступили предложения о создании трехвалковых станов для периодической прокатки шаров, профилей и других изделий.

Затем появились работы Потапова И.Н. (МИСиС) об использовании одной клетки трехвалкового стана ПВП взамен 5...6 обычных клеток продольной прокатки ДУО. Затем по предложению ВИЛСа трехвалковый стан ПВП был установлен на Верхнесалдинском металлургическом заводе для прокатки титановых труб и на самом ВИЛСе. Именно на этом

стане были проведены исследования по использованию ПВП для превращения силуминовых сплавов из литейных, малопластичных в сплавы, способные к пластической деформации [2].

На рисунке 5 показан химический состав сплава и его структура в исходном слитке и после прокатки на ПВП, а также свойства после прокатки.

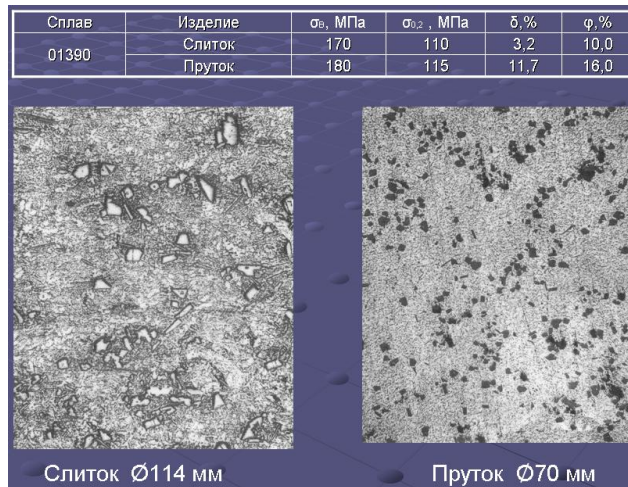


Рисунок 5 – Макроструктура силуминового сплава 01390 (x100)
Si-16,8 Cu-0,1 Mg-0,26 Mn-0,1 Ti-0,16 Fe-1,1 P-0,025 Al-ост, %

На рисунках 6 и 7 показано влияние вытяжки и степени деформации на величину размера зерна кристаллов кремния.

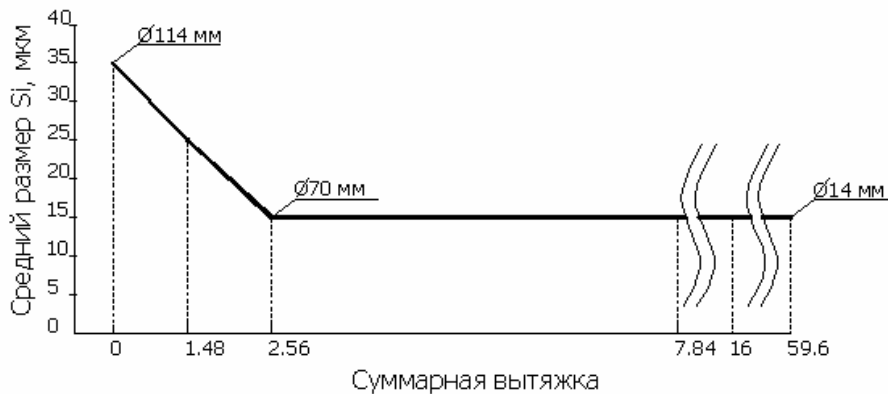


Рисунок 6 – Зависимость среднего размера кристалла кремния от вытяжки

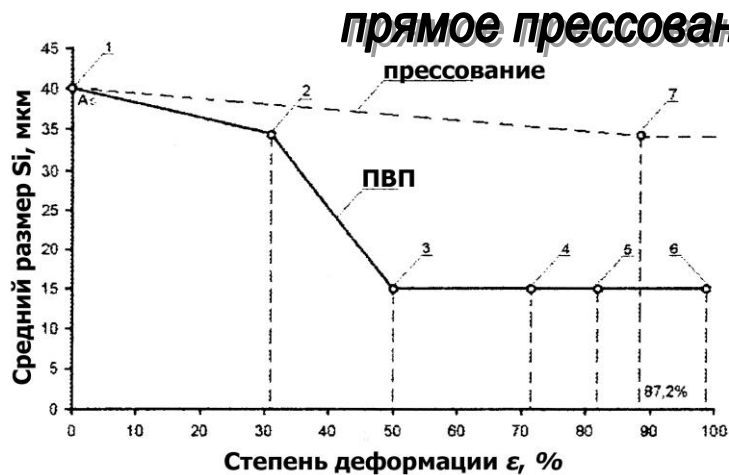


Рисунок 7 – Зависимость среднего размера кристалла кремния от степени деформации

Так же, как и при РКУ-прессовании, наступает момент «насыщения» и дальнейшая деформации не даёт результатов, а размер зерен кремния составляет 10...15 мкм. Также хорошо видно, что прямое прессование даже со степенью деформации 87% не даёт заметного измельчения зерен кремния.

На рисунке 8 показаны частотные кривые, характеризующие величину зерна от степени деформации. В процессе ПВП происходит также дробление и измельчение пластичных кристаллов алюминидов (железа, титана), а также измельчается эвтектическая основа сплава до 2,5...3,0 мкм.

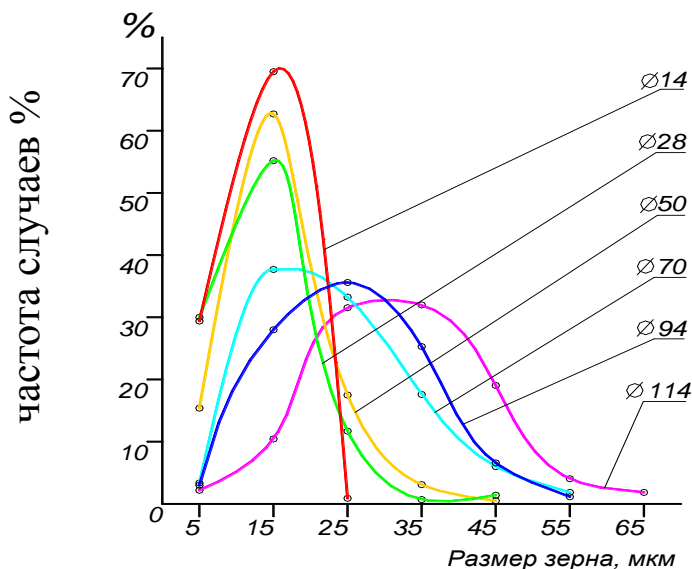


Рисунок 8 – Зависимость среднего размера кристалла кремния от степени деформации

На рисунке 9 показана достаточно хорошая проработка структуры по сечению заготовки при ПВП.

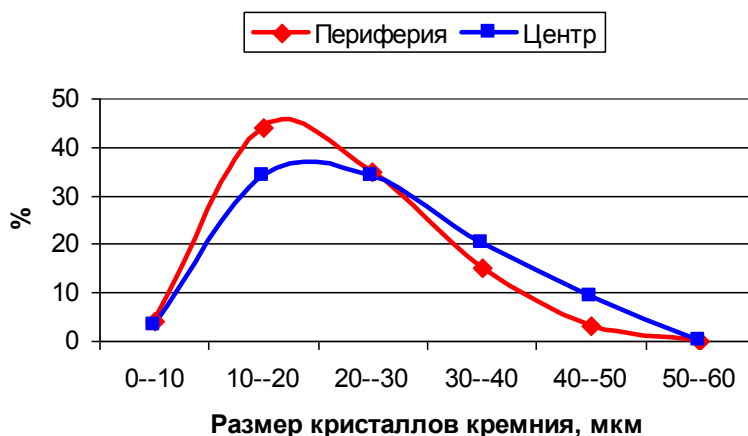


Рисунок 9 – Изменение размеров кристаллов Si по радиусу прутка Ø50 мм

На основании полученных результатов на имя руководства ЗАО «Группа ЧТПЗ» подано предложение о создании специализированного цеха (или участка) для производства сплошных и полых изделий (труб) из заэвтектических силуминовых сплавов.

Совместно с ЭЗТМ разработан также эскизный проект трёхвалкового стана ПВП (рисунок 10) для прокатки слитков с целью улучшения их пластических свойств (основная техническая характеристика приведена в таблице 3).

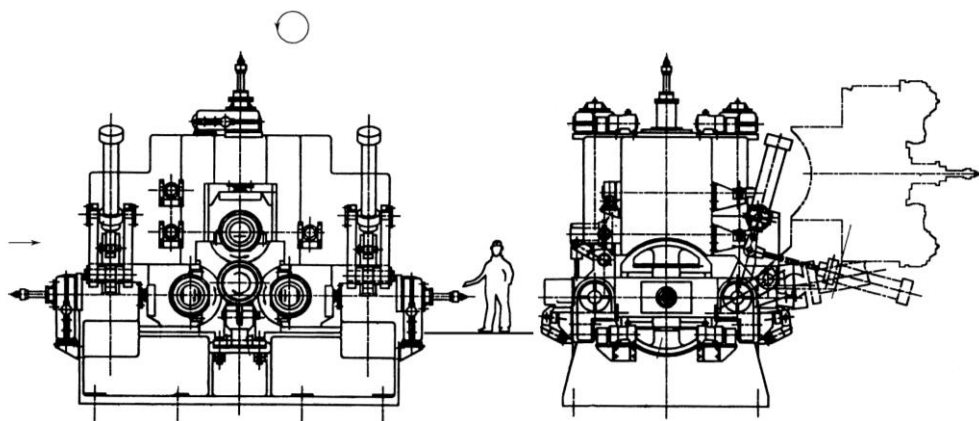


Рисунок 10 – Трёхвалковый стан ПВП

ВЫВОДЫ

1. Процесс РКУ-прессования всегда характеризуется неравномерным распределением деформаций по длине и по высоте заготовки, что приводит к неравномерному размеру зерен и неравномерным свойствам металла.

Процесс низкопроизводителен и сопровождается значительными отходами металла, т.к. формоизменение переднего и заднего концов заготовки не соответствует схеме простого сдвига основной части заготовки. Процесс может быть использован для узкого применения при деформации специальных материалов в небольших объёмах.

2. Процесс ПВП позволяет осуществлять получение достаточно равномерной ультрамелкозернистой структуры металла и обеспечивать высокую производительность при получении заготовок с круглым сечением, используемых при производстве бесшовных труб и других различных изделий способами ОМД. Специализированные станы ПВП целесообразно устанавливать вслед за установками непрерывной разливки металла, что позволит повысить качество готовых труб. ЭЗТМ разработаны и установлены два таких стана (Синарский и Северский трубные заводы), которые прокатывают заготовку после непрерывной разливки на заготовку необходимых размеров, улучшая одновременно пластические свойства металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чикалов, С.Г. Задача государственной важности [Текст]/ С.Г. Чикалов. – «Металлы Евразии», 2007, стр. 64. -69
2. Панов, Е.И. Напряженно-деформированное состояние металла при двух- и трёхвалковой схемах поперечно-винтовой прокатки [Текст]/ Е.И. Панов, В.Я. Осадчий. – Труды пятого конгресса прокатчиков. – Череповец, 2003, стр. 320 . -334
3. Рыбин, Ю.И. Анализ неравномерности деформации при равноканальном угловом прессовании [Текст]/ Ю.И. Рыбин, Р.А. Паршиков. – Труды международной технической конференции: «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2005, стр. 115.-118

Осадчий Владимир Яковлевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии обработки давлением» МГУПИ, г. Москва
Тел. (8495) 2688080
E-mail: maleksys@rambler.ru

Л.А. САВИН, А.А. ПОПИКОВ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ И ДИСБАЛАНСА РОТОРА

В работе рассматривается динамика ротора дымососа, установленного на подшипниках жидкостного трения в условиях изменения массы и дисбаланса.

In this article we considered motion exhauster rotor with film bearing when its mass and unbalance are changing.

Область применения агрегатов переменной массы (рисунок 1) весьма обширна. Наиболее важные функции возлагаются на них при осуществлении технологических процессов, связанных с обработкой масс, поступающих к исполнительным органам рабочих машин или выходящих от них в виде готового или промежуточного продукта.



Рисунок 1 – Область применения агрегатов переменной массы

Агрегаты переменной массы принадлежат к числу механических систем с переменными инерционными параметрами и изменяемой геометрией распределения масс в процессе движения [1], поэтому наиболее нагруженными и ответственными элементами, определяющими их работоспособность и ресурс, являются роторно-опорные узлы.

Некоторые из наиболее сложных на сегодня режимов работы можно найти в металлургической промышленности. К особенностям производства следует отнести: массовость (в сутки производится десятки тысяч тонн продукции); непрерывность работы (простои, связанные с проведением ремонтов, составляют 0,5—1,5 % календарного времени); тяжелые условия работы оборудования (высокие температуры, запыленность и динамические нагрузки). Это определяет общие требования, предъявляемые к металлургическому оборудованию в целом и роторно-опорным узлам в частности: надежная, безаварийная работа; высокая производительность и долговечность; возможность удобного обслуживания; проведение скоростных ремонтов; максимально возможная автоматизация.

Современная тенденция развития отрасли направлена на постоянное повышение полезной мощности, что в первую очередь связано с форсированием режимов работы существующего оборудования. Это ведет к возрастанию энергонапряженности агрегатов, что с одновременным ужесточением требований по надежности, ресурсу, габаритным размерам и массе вызывает необходимость совершенствования в первую очередь опорных узлов.

В рамках программы перспективного развития и реконструкции на Лебединском горно-обогатительном комбинате планируется поднять производительность обжиговой машины с 220 т/час до 330 т/час, что усложнит режим работы газовоздушного тракта, приведет к повышению запыленности дымовых газов. Для борьбы с налипанием пыли на лопатки рабочего колеса дымососа Д - 15000 планируется установить аппарат пескоструйной

очистки. Открытым остается вопрос регламентации периодов и продолжительности включения системы очистки.

В технологической цепочке агрегатов дымосос стоит после скруббера мокрой очистки, в случае резких перепадов влажности (в холодное время года, а также летом после дождя), влажность газа повышается, это способствует налипанию на лопатки рабочего колеса пыли. Моделирование поведения дымососа по методике [2] в условиях налипания пыли выявило слабое влияние изменения массы на динамическое поведение агрегата, поскольку масса пыли составляет не больше 0,01% от массы ротора. Тем не менее, неравномерное налипание пыли приводит к изменению дисбаланса ротора, это вызывает нестабильные режимы работы и может привести к авариям (рисунок 2).



Рисунок 2 – Коксование лопаток ротора, приведшее к выкрашиванию вкладыша подшипника

Исследования работы агрегата [3] показали (рисунок 3), что в рамках решаемой задачи с достаточной степенью точности можно принять линейный закон изменения дисбаланса ротора в процессе работы.

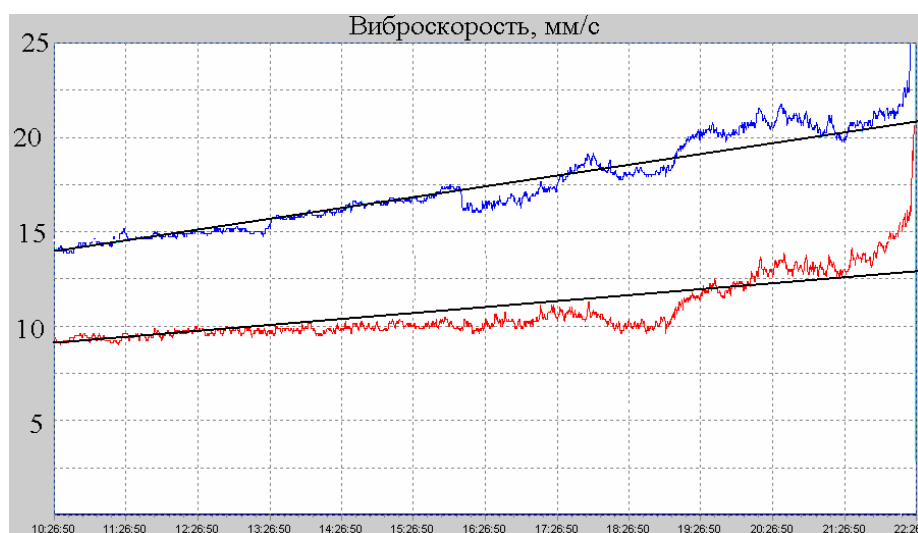


Рисунок 3 – Характер изменения вибрации дымососа

Наличие нелинейной реакции смазочной пленки подшипника жидкостного трения приводит к возникновению в системе предельного цикла колебаний.

Построение амплитудной характеристики дымососа (рисунок 4) позволяет выявить ширину зоны устойчивости предельного цикла.

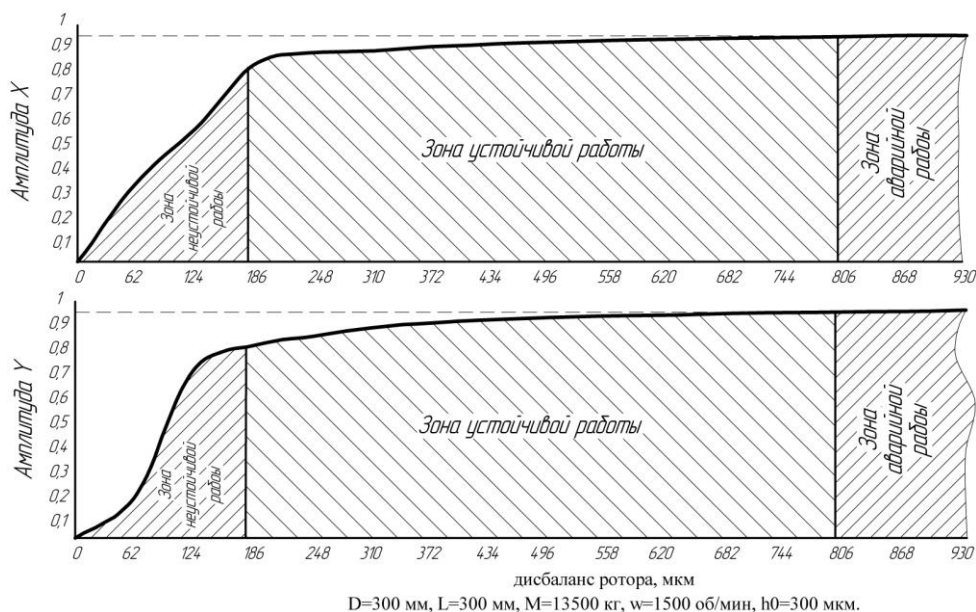


Рисунок 4 – Амплитудная характеристика дымососа

Вычислительный эксперимент позволяет получить траекторию движения ротора при использовании пескоструйного аппарата очистки (рисунок 5).

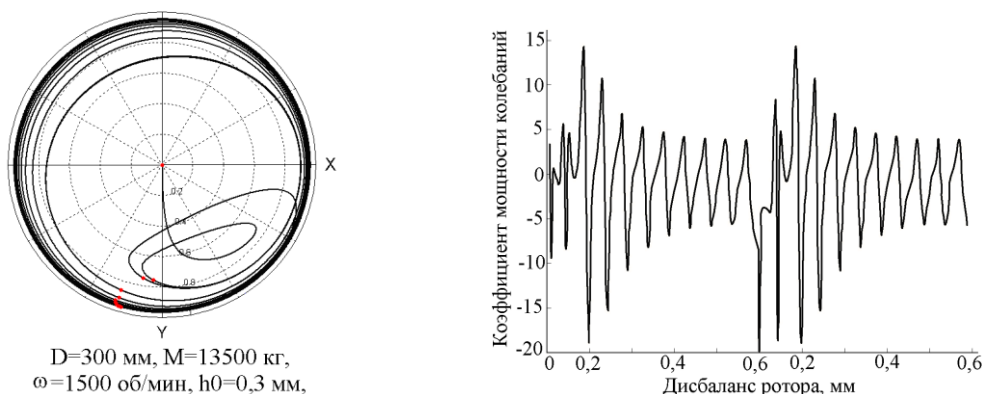


Рисунок 5 – Траектория движения ротора и диаграмма изменения мощности колебаний дымососа

Анализ диаграммы изменения коэффициента мощности колебаний показывает, что с энергетической точки зрения работа ротора на режиме предельного цикла является более выгодной, что позволяет говорить о нецелесообразности полной очистки лопаток, поскольку возникающие при сходе ротора с предельного цикла динамические воздействия крайне негативно сказываются на надежности агрегата и могут привести к ударам цапфы ротора по вкладышу подшипника и релаксации креплений опор. В то же время нормирование включения системы очистки по расписанию не позволит агрегату выйти на предельный цикл, смещая его в зону неустойчивой работы и повышенных мощностей. Таким образом, можно рекомендовать нормировать продолжительность включения пескоструйного аппарата с целью частичной очистки лопаток, позволяющей привести агрегат в начало предельного цикла.

Определение порога включения системы очистки рассчитывается, исходя из высоты микронеровностей вала и вкладыша подшипника, с учетом коэффициента запаса. Для дымососа Д - 15000 предельная толщина смазочной пленки составляет 24 мкм. Соответственно уровень «тревога», которому соответствует переход подшипника к

граничному трению, определяется лишь высотой микронеровностей (8 мкм) и предполагает немедленную аварийную остановку агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Динамика машинных агрегатов на предельных режимах движения [Текст] / И.И. Артоболевский, В.С. Лощинин – М. «Наука», 1977 г., с.236.
2. Попиков, А.А. Движение ротора переменной массы [Текст] / А.А. Попиков // Материалы VII международной конференции «Вибрационные машины и технологии»: сборник научных трудов КГТУ. – Курск, 2008. – С. 134-140.
3. Попиков, А.А. Анализ эксплуатационных характеристик дымососа [Текст] / А.А. Попиков // Материалы всероссийской научно - практической конференции «Молодые ученые – производству»: сборник трудов. – Т1. – Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2008. – С. 188-191.

Савин Леонид Алексеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
Тел.: +7(4862)41-98-49
E-mail: pmpl@ostu.ru

Попиков Александр Александрович

Старооскольский технологический институт (филиал) МИСиС, г. Старый Оскол
Аспирант
Тел.: +7(4725)32-98-41
E-mail: sanyok_s@bk.ru

О.В. СОЛОМИН, А.А. МОРОЗОВ

ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ НА ОПОРАХ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

В статье рассмотрены хаотические колебания роторов на опорах жидкостного трения. Характерной особенностью является расчет поля давлений подшипника скольжения путем численного решения уравнения Рейнольдса. Получены хаотические траектории движения центра цапфы ротора, а также бифуркационная диаграмма движения ротора.

In article considered chaotic vibration of rotors supported by fluid film bearings. Specific of feature of simulation and numerical solving Reynold's equation. Also given strange attractors and bifurcations diagrams of rotor motion.

Широкое распространение в качестве опор в роторных машинах различного назначения получили подшипники жидкостного трения, как обладающие по сравнению с опорами качения повышенной предельной быстроходностью, высокими демпфирующими свойствами, большой устойчивостью к ударным силовым перегрузкам и меньшими габаритами в радиальном направлении.

Движению роторов на опорах жидкостного трения посвящено большое количество работ, например [1 - 5]. Однако, в основном, в этих работах рассматривались линеаризованные модели роторных систем на опорах жидкостного трения. Так, например, реакции смазочного слоя заменялись линейными аппроксимациями, что справедливо для небольших отклонений и скоростей вращения ротора. Реалии же таковы, что с возрастанием частот вращения роторов начинают проявляться нелинейные эффекты, связанные, например, с взаимодействием ротора и статора, а также вызванные нелинейностью смазочного слоя [7].

В последние десять лет внимание исследователей все больше направлено на изучение так называемых хаотических вибраций в роторах на опорах жидкостного трения [6-8]. Это связано с тем, что в современных роторных системах на опорах жидкостного трения наблюдается рост скоростей вращения ротора. При этом все более существенный вклад начинают вносить нелинейные эффекты, обусловленные смазочным слоем или контактным взаимодействием ротора и статора.

Так, например, в работе [6] автором рассмотрен гибкий симметричный ротор на подшипниках жидкостного трения. В данной работе для нахождения реакций смазочного слоя использовалась модель ротора Джеффкотта. Автор построил хаотические траектории в фазовом пространстве, исследовал условия возникновения хаотических вибраций, используя сечения Пуанкаре и бифуркационные диаграммы. В работе [7] хаотическое движение ротора обусловлено контактным взаимодействием ротора и статора, причем контакт моделируется кусочно-нелинейной пружиной, которая является мягкой при вертикальном движении от положения покоя внутрь зазора и жесткой при вертикальном движении от положения покоя в направлении контакта.

В работе [5] рассмотрен жесткий симметричный ротор на гладких опорах жидкостного трения. Хаотическое движение обусловлено в данном случае контактом ротора и статора. Авторами получены теоретические и экспериментальные траектории движения центра цапфы ротора, сечения Пуанкаре и бифуркационные диаграммы роторной системы. Хаотические колебания в обоих случаях обусловлены контактным взаимодействием ротора и статора

В вышеперечисленных работах реакции смазочного слоя заменяют различными аппроксимациями. Эти модели, тем не менее, позволяют достаточно точно описать поведение ротора в случае наличия контактного взаимодействия. Однако данные модели роторных систем не лишены недостатков. Так, при нахождении поля давлений рассматриваются в основном аппроксимации «короткого подшипника». Такой подход не позволяет, в частности, рассматривать опоры жидкостного трения с камерами.

Хаотическое движение ротора характеризуется сильной зависимостью от начальных условий, сложной траекторией в фазовом пространстве и непрерывным спектром Фурье [6]. Аперриодические (хаотические) колебания в роторных системах играют важную роль, так как в этом режиме система «ротор-подшипник» является неустойчивой и испытывает бифуркации.

При этом возникает необходимость решить систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка с нелинейной правой частью, описывающую движение ротора. Нелинейная правая часть порождает необходимость использовать численные методы решения ОДУ. В первую очередь, нас интересует установившееся движение жесткого ротора. Переходные процессы представлены, например, в работе [1].

В данной работе для решения системы ОДУ был использован метод Хемминга [10]. Данный метод был выбран, как обладающий наибольшей устойчивостью среди численных методов решения ОДУ. Необходимо учесть, что не существует общепринятого критерия установившегося движения. Факт наличия установившегося движения полностью зависит от условий вычислительного эксперимента и опыта экспериментатора [7].

Рассмотрим модель симметричного жесткого горизонтального ротора на двух одинаковых опорах жидкостного трения (рисунок 1).

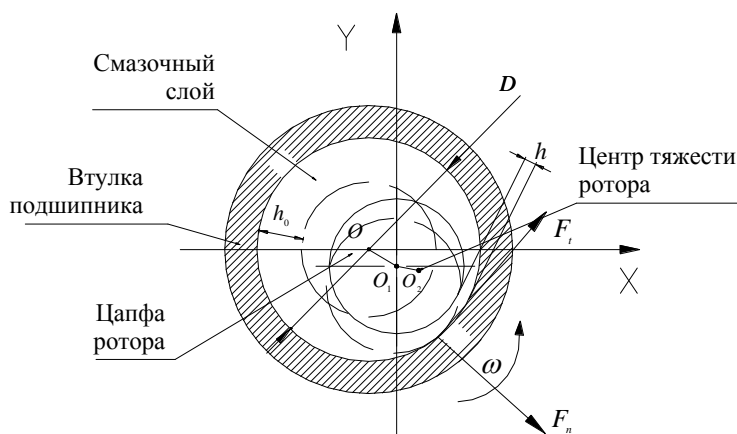


Рисунок 1 – Схема подшипника жидкостного трения

Тогда уравнение движения центра цапфы на основании второго закона Ньютона будет иметь вид:

$$\begin{cases} M\ddot{X} = R_x(X, Y, \dot{X}, \dot{Y}) + F_x + M\Delta\omega^2 \cos(\omega t), \\ M\ddot{Y} = R_y(X, Y, \dot{X}, \dot{Y}) + F_y + M\Delta\omega^2 \sin(\omega t) - Mg, \\ F_x = -F_N \cos(\gamma) + F_t \sin(\gamma), \\ F_y = -F_N \sin(\gamma) - F_t \cos(\gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где M – масса ротора, приходящаяся на одну опору; Δ – дисбаланс; ω – частота вращения ротора, F_N – нормальная составляющая силы, с которой взаимодействуют ротор и статор, F_t – тангенциальная составляющая, F_x, F_y – составляющие по оси x и y , соответственно.

$$F_N = \begin{cases} 0, & (e < \delta), \\ (e - \delta)K_c, & (e \geq \delta), \end{cases} \quad F_t = fF_N, \quad (2)$$

e – эксцентриситет, $e = \sqrt{Y^2 + X^2}$, f – коэффициент трения между ротором и статором, γ – полярный угол точки контакта ротора и статора, K_c – коэффициент жесткости при ударе, t – время, g – ускорение свободного падения, X, Y – декартовы координаты центра ротора.

Входящие в систему (2) реакции смазочного слоя R_x и R_y были найдены путем численного интегрирования поля давлений, полученного в результате решения основного

уравнения гидродинамической теории смазки роторных систем на каждом шаге интегрирования по времени:

$$R_x = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \sin \alpha dx dz; \quad (3)$$

$$R_y = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \cos \alpha dx dz.$$

где p – давление смазочного слоя в подшипнике.

Основное уравнение гидродинамической теории смазки имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_z} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot U \cdot h) - 12 \rho V + 12 h \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

где U и V – скорости в точках на поверхности цапфы, p – давление в смазочном материале, h – функция радиального зазора, ρ – плотность смазочного материала, μ – вязкость смазочного материала, K_x и K_z – коэффициенты турбулентности [1].

Уравнение (4) было решено методом конечных элементов.

В результате было получено множество точек $\{X_i, Y_i\}$, $i = 0..N$. Этот набор точек называют также фазовым портретом системы. Полученные в результате численного эксперимента траектории подверглись анализу с использованием методов детерминированного хаоса и синергетики.

При изучении хаотических вибраций используют различные методы. Чаще всего для этих целей используется метод изучения спектра Фурье колебаний, сечение Пуанкаре и бифуркационные диаграммы.

Различают качественные методы анализа хаотического сигнала и количественные методы. К качественным методам анализа относятся: анализ спектра Фурье колебаний, сечение Пуанкаре, вейвлет-анализ и анализ бифуркационных диаграмм. К количественным методам относятся: вычисление фрактальной размерности, вычисление показателей Ляпунова, построение автокорреляционной функции [3].

Фурье-анализ основан на преобразовании вида [5]:

$$z_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^N X_j e^{i \left(-i \frac{2\pi j k}{N} \right)}, \quad j = 1..N, \quad (5)$$

где $\hat{z}_k = \text{Re}_k + i \text{Im}_k$, X_j – координаты точек фазового пространства, i – мнимая единица.

В хаотическом режиме спектр Фурье непрерывен [1]. Основным недостатком преобразования Фурье является то, что это преобразование не может провести различие между случайными и апериодическими сигналами. Поэтому часто в совокупности с методом Фурье используют и метод сечения Пуанкаре.

Метод сечения Пуанкаре позволяет перейти от непосредственного анализа системы (1) к анализу дискретного отображения

$$P_{k+1} = T(P_k), \quad (6)$$

где P_k – точка фазового пространства, $P_k = \{X_k, Y_k\}$, тем самым, мы уменьшаем фазовое пространство на единицу [7]. В случае хаотического аттрактора сечение Пуанкаре представляет собой множество точек, принадлежащих траектории движения ротора, располагающихся на фазовой плоскости и обладающих фрактальной структурой. Вместе с сечением Пуанкаре часто применяют метод бифуркационных диаграмм, который позволяет провести анализ системы при изменении какого-либо параметра.

Анализируя систему с помощью бифуркационных диаграмм, как правило, по одной оси откладывают значение какого-либо параметра системы, например, частоты вращения ротора, а по другой оси – некоторую характеристику системы, например, точки сечения Пуанкаре [8,10]. Данный метод позволяет исследовать систему в зависимости от значения её параметров.

Анализ с помощью фрактальной размерности основан на использовании формулы [10]:

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}, \quad (7)$$

где D – фрактальная размерность аттрактора, $N(\varepsilon)$ – количество ячеек, в которые попала хотя бы одна точка. В случае хаотического аттрактора фрактальная размерность будет дробной. Фрактальная размерность может быть получена при помощи численного алгоритма.

Старший показатель Ляпунова вычисляется при помощи формулы:

$$\Lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \|\tilde{x}(t)\|, \quad (8)$$

где Λ – старший показатель Ляпунова, $\tilde{x}(t) = x_1(t) - x_2(t)$ – вариация траектории движения, t – время [10]. Старший показатель Ляпунова является важнейшей характеристикой движения ротора, он показывает, как быстро траектории разбегаются при варьировании начальных условий. В случае хаотического движения он представляет собой положительное число [9,10]. Для вычисления показателей Ляпунова использовался алгоритм Бенеттина [10].

В результате численного эксперимента были получены траектории, сечения Пуанкаре и развертки Фурье для различных типов колебаний (рисунок 2).

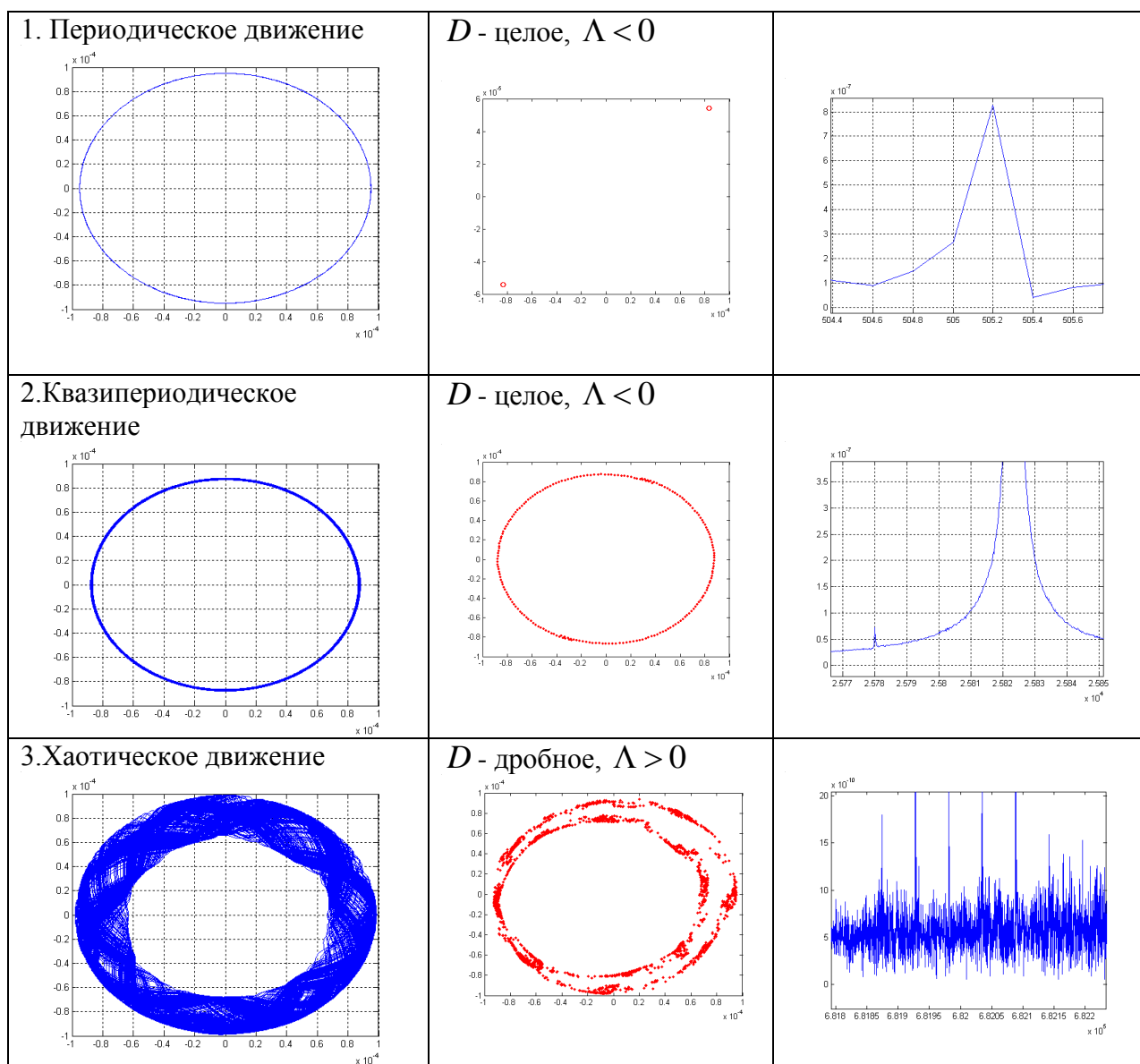
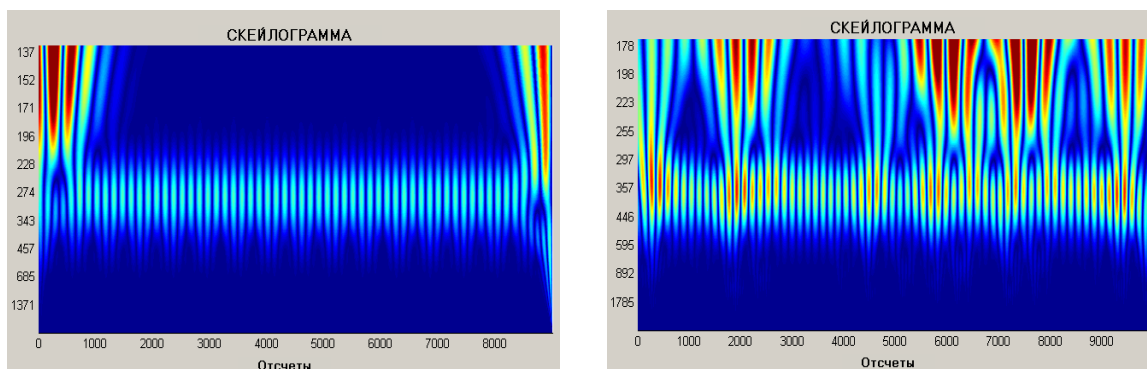


Рисунок 2 – Основные типы траекторий движения ротора

На рисунке 2 представлены три основных типа движения: периодическое, квазипериодическое и хаотическое. Из рисунков видно, что периодическому движению соответствует несколько точек сечения Пуанкаре и спектр Фурье, состоящий из одного пика. Квазипериодическому движению соответствует множество точек, располагающихся на некоторой кривой сечения Пуанкаре и спектр Фурье, состоящий из нескольких пиков. Хаотическому аттрактору соответствует с первого взгляда неупорядоченное множество точек, располагающихся в некотором фазовом объеме. Однако при ближайшем рассмотрении это множество точек обладает фрактальной структурой. Спектр Фурье хаотического сигнала сплошной.



а).

б).

Рисунок 3 – Скейлограммы периодического и хаотического движения ротора

Были построены скейлограммы для периодического (а) и хаотического (б) движения ротора (рисунок 3). На данных рисунках хорошо виден переходной процесс движения ротора, где скейлограмма на краях слегка размазана.

Видно, что хаотическому движению соответствует скейлограмма с фрактальной структурой коэффициентов.

Также была построена бифуркационная диаграмма роторной системы, в которой в качестве параметра выступила частота вращения ротора (рисунок 4).

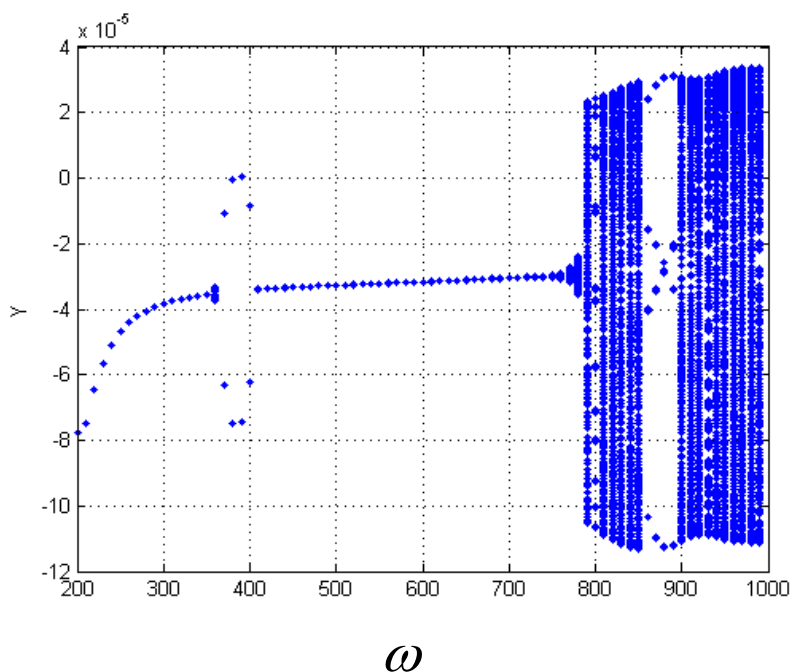


Рисунок 4 – Бифуркационная диаграмма

На данной диаграмме видно, при каком значении скорости вращения ротора происходит бифуркация, то есть качественное изменение характера движения. Так, в интервале от 200 рад/с до 750 рад/с мы наблюдаем периодическое движение. В интервале от 750 рад/с до 800 рад/с наблюдается квазипериодическое движение. В интервале от 800 рад/с до 860 рад/с имеет место хаотическое движение.

ВЫВОДЫ

Исследование показало, что хаотические колебания могут появляться при увеличении частоты вращения ротора. В этом случае возможен контакт ротора и статора, который приводит к аperiodическому движению. Также причиной появления хаоса может стать статический дисбаланс ротора.

Однако не всегда контакт ротора и статора может приводить к хаотическому движению, возможна обкатка статора ротором. Частота вращения варьировалась в пределах 200 – 1000 рад/с, дисбаланс – 3-5 микрон, масса системы 4 кг, моделирование проводилось на гладком подшипнике.

Все расчеты были проведены в программе Анрос - нелинейный анализ, написанной авторами. Построение скейлограмм было проведено в программе Анрос - сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamamoto T., Ishida Y. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications. – New York, John Willey & Sons, 2001. – 326 p.
2. Chu F., Zhang Z. Periodic, quasi-periodic and chaotic vibrations of a rub-impact rotor system supported on oil film bearings // Int. J. of Engineering Science, 1997. – № 10/11. P. 963 – 973.
3. Эрих, Ф.Ф. Явление хаотических вибраций в динамике высокоскоростных роторных систем [Текст] / Ф.Ф. Эрих.
4. Kirk R.G., Gunter E.J., Transient Response of Rotor – Bearing Systems // ASME, 1973.
5. Karpenko E.V., Wiczigroch M., Pavlovskaja E.E., Neilson R.D. Experimental verification of Jeffcott rotor model with preloaded snubber ring // Journal of Sound and Vibration, 2006. – № 298. P. 907 - 917.
6. Issam Abdullah Abu – Mahfouz, Routes to Chaos in rotor dynamics // 1993.
7. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вилсон. — М.: Стройиздат, 1982. — 448 с.
8. Хайпер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи [Текст] / Э. Хайпер, С. Нёрсетт, Г. Ваннер. — М.: Мир, 1990. - 512 с.
9. Берже, П. Порядок в хаосе [Текст] / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. — М.: Мир, 1991. - 368 с.
10. Кроновер, Р. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории [Текст] / Р. Кроновер. — М.: Постмаркет, 2000. - 353 с.

Морозов Андрей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант
Тел.(0862)419849
E-mail: pmpl@ostu.ru

Соломин Олег Вячеславович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук
E-mail: solomin@orel.ru

УДК: 621.91.02

А.В. КАТУНИН, А.А. ЖИРКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПУЛЬСАТОРОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

В Орловском государственном техническом университете разработана технология повышения эффективности прерывистого резания на основе предложенного авторами способа снижения амплитуды и длительности послеударных вибраций.

In Orel State Technical University the technique of the increasing of interrupted cutting effectiveness on the basis of the authors' method of the amplitude and vibration longitude reducing is developed.

Одной из основных причин снижения стойкости и прочности инструментов, работающих в условиях прерывистого резания, является ударный характер первоначального взаимодействия инструмента с заготовкой, обуславливающий появление послеударных вибраций, сопровождающихся постоянным изменением действующих сил, углов, а также увеличением пути резания, проходимого вершиной инструмента.

Для повышения эффективности прерывистого резания авторами предложен способ снижения амплитуды и длительности послеударных вибраций [1]. Суть способа заключается в предварительном (до касания с заготовкой) управляемом импульсном силовом воздействии на инструмент, предопределяющем значительное уменьшение амплитуды и продолжительности его колебаний в процессе последующего резания. При этом необходимо обеспечить смещение во времени между моментом начала предварительного управляемого импульсного силового воздействия на инструмент и моментом его касания с заготовкой, а также необходимые форму и длительность воздействующего импульса.

Реализация предложенного способа снижения вибраций при прерывистом резании предполагает использование мощных и высокоточных генераторов силовых импульсов. Существующие устройства (пульсаторы) можно разделить по способу силовозбуждения на: механические, гидравлические, пневматические и электрические.

Принцип действия устройств механического силовозбуждения основан на преобразовании вращательного движения ротора электродвигателя в поступательные или вращательные движения нагружателя. Механические пульсаторы воспроизводят достаточную амплитуду динамических нагрузок, однако они имеют очень высокую инерционность.

Гидравлические и пневматические пульсаторы обладают возможностью точного воспроизведения силовых импульсов большой амплитуды в широком диапазоне частот. Однако эти устройства имеют достаточно сложную конструкцию, высокую стоимость и значительные габариты.

Электрические пульсаторы подразделяются на электростатические, электродинамические и магнитострикционные.

Свойства электродинамических пульсаторов наилучшим образом соответствуют условиям реализации указанного способа снижения амплитуды и длительности вибраций при прерывистом резании. Принцип действия этих устройств основан на преобразовании электрической энергии в механические перемещения. Использование электродинамических пульсаторов в совокупности с современными системами управления обеспечивает хорошее управление характером нагружения и высокую точность воспроизведения силовых импульсов в заданные моменты времени.

При протекании ударных процессов в виброударных системах кроме затрат энергии на совершение полезной работы имеются дополнительные энергетические затраты. Основная их часть расходуется на работу, совершаемую при деформации собственных звеньев ударной цепи устройства и локальную деформацию в местах их контакта. Поэтому полная

кинетическая энергия, которой должна обладать ударная часть устройства в момент соударения с инструментом, должна превосходить сумму полезной и дополнительной работы:

$$T_{\text{полная}} > A_{\text{полезная}} + A_{\text{дополнительная}}. \quad (1)$$

Формула для определения кинетической энергии ударника имеет вид:

$$T_u = \frac{m_u v_u^2}{2}, \quad (2)$$

где m_u – масса ударника;

v_u – скорость ударника.

Экспериментально установлено, что для реализации предлагаемого способа снижения вибраций при прерывистом резании в широком диапазоне изменения параметров процессов строгания и точения необходимо, чтобы максимальная кинетическая энергия ударника была в пределах от 1,9 Дж до 2,1 Дж.

Прямая генерация ударных импульсов, посредством ускорения некоторой массы m_u до необходимой скорости v_u только усилием электромагнита, обуславливает значительное увеличение габаритов и массы установки, что в условиях прерывистого резания недопустимо.

Для достижения поставленной цели было решено использовать известный способ увеличения энергии удара, основанный на явлении резонанса упругой динамической системы, при котором совпадение частот собственных и вынужденных колебаний приводит к многократному увеличению амплитуды и скорости совершаемых колебаний.

На рисунке 1 представлена динамическая модель консольной части инструмента и устройства для его импульсного силового нагружения в виде двух одномассовых систем с общей неподвижной опорой.

При изменении электромагнитной силы $F_e(t)$ по закону:

$$F_e(t) = A_{Fe} \cdot \sin(\omega_{Fe} \cdot t), \quad (3)$$

где ω_{Fe} – круговая частота электромагнитной силы F_e ; A_{Fe} – амплитуда колебаний электромагнитной силы F_e , масса M_u совершает гармонические колебания, амплитуда и кинетическая энергия T_u которых будет максимальна, при условии равенства частоты колебаний электромагнитной силы ω_{Fe} и собственной частоты ударника ω_u (рисунки 2 и 3).

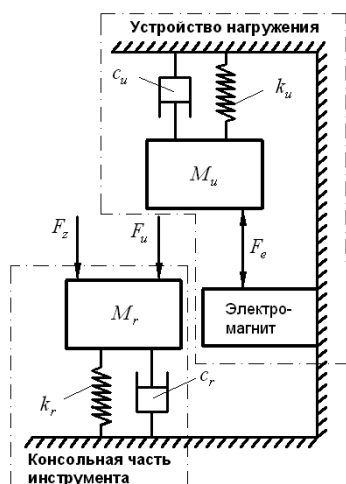


Рисунок 1 – Динамическая модель консольной части инструмента и устройства для импульсного силового нагружения:

k_r, k_u – коэффициенты жесткости; c_r, c_u – демпфирующие способности; M_r, M_u – приведенные массы; F_z – сила взаимодействия инструмента и заготовки при резании; F_u – сила удара; F_e – электромагнитная сила

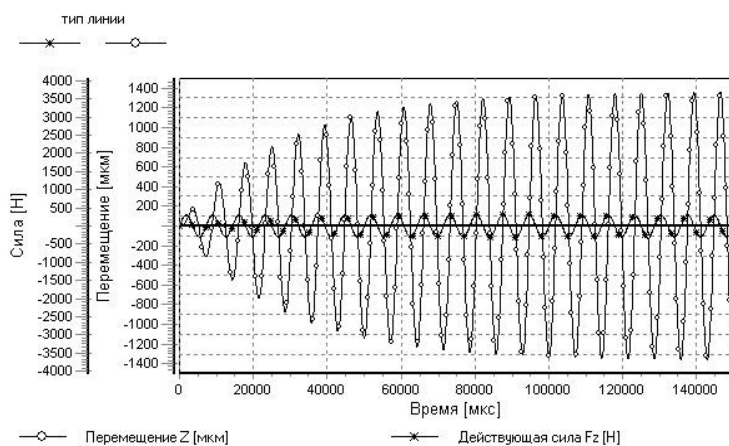


Рисунок 2 – Диаграмма колебаний ударника и электромагнитной силы при совпадении их частот: $M_u = 3,5$ кг, $A_{Fe} = 300$ Н, $\omega_{Fe} = \omega_u = 880$ рад/сек

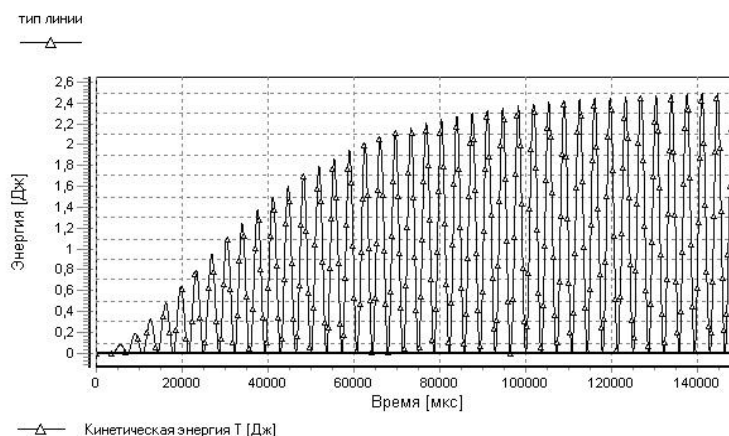


Рисунок 3 – Диаграмма кинетической энергии ударника при совпадении его собственной частоты с частотой электромагнитной силы: $M_u = 3,5$ кг, $A_{Fe} = 300$ Н, $\omega_{Fe} = \omega_u = 880$ рад/сек

Как видно из рисунков, устойчивые резонансные колебания ударника появляются к моменту времени $t_1 \approx 140$ мс, при этом максимальное значение кинетической энергии достигает величины 2,6 Дж. Этого количества энергии достаточно для осуществления предварительного импульсного силового воздействия на инструмент и реализации способа снижения послеударных вибраций при прерывистом резании.

Электродинамические пульсаторы использованы авторами при создании устройств для стабилизации: процесса строгания и прерывистого точения. Производственные испытания устройств показали их работоспособность и эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катунин, А. В. Способ снижения вибраций инструмента при прерывистом резании [Текст] / А.В. Катунин, А.А. Жирков // Известия ОрелГТУ. Серия Машиностроение. Приборостроение. – 2005.- №2.- С. 60-65.

Катунин Александр Валентинович

Технологический институт Орловского государственного технического университета, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
Тел.: 55-55-24, 89103062266
E-mail: kat@ostu.ru.

Жирков Александр Александрович

Технологический институт Орловского государственного технического университета, г. Орел
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
Тел.: 54-14-19
E-mail: kat@ostu.ru.

С.Ф. КОРНДОРФ, Т.И. НОГАЧЁВА, Н.В. ДАВЫДОВА

РАЗДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ НА ПОТЕРИ ОТ ПЕРЕПОЛЯРИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

В статье показана возможность разделения потерь энергии в диэлектрике, помещённом в переменное электрическое поле, на потери, обусловленные процессами переполаризации и электронной проводимостью.

In the article is shown the possibility of the segregation of losses of energy in the dielectric material, pomeshchennom into the electric field. Losses divide into the losses, caused by the processes of repolarization and loss from the electronic conductivity.

В настоящее время широко применяются жидкие диэлектрические смазочные материалы, которые часто называют маслами. Они, как любая другая продукция, требуют при их производстве и использовании контроля параметров, определяющих работоспособность в заданных условиях, которая зависит от целого ряда физико-химических свойств диэлектрика, зачастую изменяющихся в процессе эксплуатации смазочного материала. Вследствие этого необходимо проводить контроль качества рассматриваемых материалов не только при их выпуске, но и в процессе эксплуатации. Среди огромного количества методов и средств контроля качества жидких диэлектрических смазочных материалов, прежде всего, следует выделить электрические методы вследствие их известных преимуществ по сравнению с другими методами.

Обычно электрические свойства диэлектрика характеризуются двумя физическими величинами: диэлектрической проницаемостью ϵ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Могут использоваться и другие параметры, например, добротность $Q = \frac{1}{\text{tg}\delta}$ или активное сопротивление [1]. Однако определение этих параметров не увеличивает информации, характеризующей диэлектрик, так как все указанные величины функционально связаны друг с другом.

При измерении параметров жидкого диэлектрика его заливают в измерительную ячейку, представляющую собой конденсатор, образованный, например, двумя плоскими, параллельно расположенными электродами, и на основании результатов измерения определяют параметры такой измерительной ячейки: ёмкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$.

Для физического истолкования этих параметров можно использовать две эквивалентных схемы замещения ёмкостной ячейки, при которых измерительную ячейку изображают в виде последовательной (рисунок 1а) или параллельной (рисунок 1б) схем соединения идеальной ёмкости без потерь и резистора, сопротивление которого равно сопротивлению потерь измерительной ячейки [2]. Под потерями в измерительной ячейке понимают потери в исследуемом диэлектрике, без учёта потерь в элементах конструкции измерительной ячейки.

При последовательной схеме замещения сопротивление потерь ячейки определяется выражением:

$$r = X_c \text{tg}\delta, \quad (1)$$

где X_c – реактивное сопротивление ячейки, заполненной диэлектриком, равное:

$$X_c = \frac{1}{2\varepsilon C}; \quad (2)$$

C – идеализированная емкость измерительной ячейки без учёта краевых эффектов, равная

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}; \quad (3)$$

S – площадь каждого электрода измерительной ячейки;

d – расстояние между электродами;

f – частота тока, создающего электрическое поле.

При параллельной схеме замещения сопротивление потерь определяется, как:

$$R = \frac{X_c}{\operatorname{tg}\delta}. \quad (4)$$

Потери энергии в реальном диэлектрике можно разделить на две части: потери, вызванные электронно-ионной проводимостью и процессами переполяризации [3]. Поэтому более целесообразно в схемах замещения измерительной ячейки, например, в параллельной, (рисунок 1б), сопротивление потерь представлять как параллельное (рисунок 2) соединение сопротивлений потерь на переполяризацию R_{III} и на электронную проводимость $R_{\text{Э}}$.

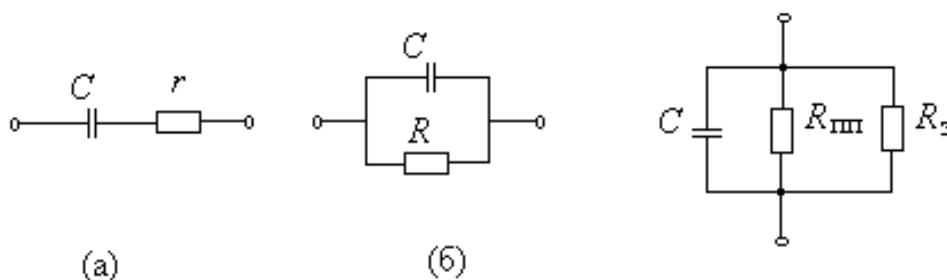


Рисунок 1– Эквивалентные схемы замещения измерительной ячейки:

(а) последовательная схема, (б) параллельная схема

Рисунок 2 – Параллельная схема замещения измерительной ячейки с учетом потерь на переполяризацию и на электронную проводимость

При использовании эквивалентных схем замещения, приведенных на рисунке 1, активные сопротивления в них поглощают энергию, равную сумме потерь на электропроводность и переполяризацию, но при этом все потери относят к потерям на электропроводность.

Значение полной энергии потерь в измерительной ячейке W_{II} определяют по результатам измерения емкости C и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Для параллельной схемы замещения мощность потерь в ячейке зависит от амплитуды напряжения U_{M} , приложенного к ячейке, и сопротивления потерь R :

$$P_{\text{II}} = \frac{U_{\text{M}}^2}{2R}, \quad (5)$$

а энергия, теряемая в ячейке за период T :

$$W_{\text{II}} = PT = \frac{P}{f}, \quad (6)$$

или с учетом выражений (3), (4) и (5):

$$W_{\Pi} = \frac{U_M^2}{2Rf} = \frac{E_M^2}{d^3} 2\varepsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (7)$$

где E_M – максимальная напряжённость электрического поля в диэлектрике.

Удельная энергия потерь в ячейке, то есть потери за период, отнесённые к единице объёма диэлектрика, определяются как отношение полной энергии потерь W_{Π} к объёму V измерительной ячейки:

$$W_{\text{пуд}} = \frac{W}{V} = \frac{W}{Sd} = 2\pi\varepsilon \frac{E_M}{d^4} \operatorname{tg} \delta. \quad (8)$$

Часто для характеристики свойств диэлектрика вводят понятие комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_a + j\varepsilon_p. \quad (9)$$

Значение её действительной части ε_a характеризует ёмкостную проводимость диэлектрика, а значение мнимой части – сопротивление потерь. В этом случае также определяются суммарные потери, но в отличие от рассмотренного выше варианта все потери относят к потерям на переполяризацию, что вполне допустимо, так как в большинстве случаев потери от переполяризации больше потерь от электропроводности.

В диэлектрике протекает несколько разнородных процессов переполяризации, которые делятся на две группы: быстрые и медленные [4]. К процессам быстрой переполяризации относят процессы электронной поляризации за счёт упругого смещения орбит электронов относительно ядра в атоме и ионной поляризации за счёт упругого смещения положительно и отрицательно заряженных ионов в узлах кристаллических решёток. Эти процессы протекают очень быстро и практически совпадают по фазе с переменным электрическим полем, приложенным к диэлектрику. Поэтому потери энергии, связанные с этими процессами переполяризации, очень малы, и их практически можно не учитывать.

К медленным процессам переполяризации, приводящим к значительным потерям энергии, относят процессы дипольной поляризации, связанной с поворотом дипольных молекул в полярных диэлектриках, ионно-релаксационной поляризации, возникающей при неплотной упаковке ионов, и миграционной поляризации, возникающей при наличии в диэлектриках микроскопических неоднородностей.

Поскольку наличие потерь энергии в рассмотренных случаях практически целиком относится к процессам медленной переполяризации, то эти потери, характеризующие процессы переполяризации, графически могут быть изображены в виде петли гистерезиса, построенной в координатах (E, D) , где E – напряжённость электрического поля в диэлектрике, а D – электрическая индукция. Пример такой петли диэлектрического гистерезиса показан на рисунке 3.

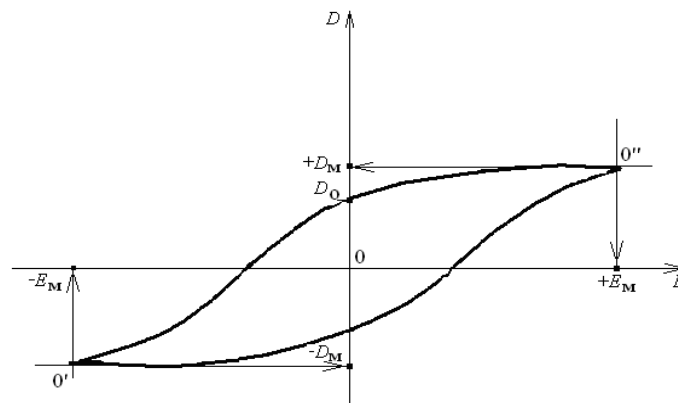


Рисунок 3 – Петля диэлектрического гистерезиса

Площадь петли гистерезиса F определяет удельные потери энергии $W_{\text{пуд}}$ за период переполяризации. Следует еще раз отметить, что при рассматриваемом толковании потерь, их принято целиком относить к потерям от переполяризации, в то время как при использовании эквивалентной схемы замещения с конденсатором и резистором все потери целиком принято относить к процессам электропроводности, однако на самом деле в обоих случаях эти потери являются суммарными, и поэтому одинаковы.

Для определения удельных потерь энергии на переполяризацию $W_{\text{пуд}}$ необходимо знать уравнения, описывающие верхнюю и нижнюю ветви петли гистерезиса:

$$W_{\text{пуд}} = \int_{-E_M}^{+E_M} [f_1(E_t) - f_2(E_t)] \cdot dE, \quad (10)$$

где $f_1(E_t)$ и $f_2(E_t)$ – уравнения аппроксимации верхней и нижней ветвей петли гистерезиса;

E_t – мгновенное значение напряженности электрического поля.

Так как петля гистерезиса по обе стороны от оси D имеет одинаковые площади, то выражение (10) можно представить в виде:

$$W_{\text{пуд}} = 2 \cdot \int_0^{+E_M} [f_1(E_t) - f_2(E_t)] \cdot dE. \quad (11)$$

В литературе приводятся несколько моделей аппроксимации петли гистерезиса, однако все они недостаточно точно соответствуют процессам, протекающим в диэлектрике, поэтому целесообразно использовать наиболее общую модель Релея, при которой ветви петли гистерезиса аппроксимируются полиномом вида:

$$D = a_0 + a_1 \cdot E_t + a_2 \cdot E_t^2 + a_3 \cdot E_t^3 + \dots \quad (12)$$

Однако поскольку Релей для определения коэффициентов этого уравнения использовал только две точки $(-E_M, -D_M)$, $(+E_M, +D_M)$ и условие симметрии кривой гистерезиса (то есть всего три условия), то он смог определить только три первых числа полинома. Из условия симметрии вытекает, что $a_0 = 0$, и исходное уравнение Релея принимает вид:

$$D = a_1 \cdot E_t + a_2 \cdot E_t^2. \quad (13)$$

В соответствии с выражением (13) уравнения, описывающие ветви петли гистерезиса, в общем случае имеют вид [5]:

$$D = \varepsilon E_t \pm (\varepsilon - \varepsilon_1) \frac{E_M^2 - E_t^2}{2 \cdot E_M^2}, \quad (14)$$

где $\varepsilon = \frac{D_M}{E_M}$; $\varepsilon_1 = \text{tg} \delta_1$ (δ_1 – угол, образованный касательной к петле гистерезиса в её начальной точке и осью E).

Поскольку в соответствии с законом причинно-следственной связи должно выполняться условие $\delta_1 = 0$, то уравнение (14) принимает вид:

$$D = \varepsilon \left[E_t \pm \frac{E_M^2 - E_t^2}{2 \cdot E_M^2} \right]. \quad (15)$$

В полученное уравнение Релея (15) входит только один параметр диэлектрика – диэлектрическая проницаемость ε , и, следовательно, никакой новой дополнительной информации о диэлектрике это уравнение дать не может. Поэтому для получения дополнительной информации необходимо использовать как минимум еще один член полинома (12).

Тогда в соответствии с принятой системой координат уравнения, описывающие верхнюю (в) и нижнюю (н) ветви петли гистерезиса, принимают вид:

$$D_{\text{в}} = D_{\text{м}} - a_1(E_t - E_{\text{м}}) - a_2(E_t - E_{\text{м}})^2 - a_3(E_t - E_{\text{м}})^3; \quad (16)$$

$$D_{\text{н}} = -D_{\text{м}} + a_1(E_t + E_{\text{м}}) + a_2(E_t + E_{\text{м}})^2 + a_3(E_t + E_{\text{м}})^3. \quad (17)$$

Так как в точке $E_t = E_{\text{м}}$, соответствующей началу каждой ветви петли гистерезиса, $\text{tg}\alpha_1 = 0$, то, например, для верхней ветви:

$$\text{tg}\alpha_{1\text{в}} = \frac{dD_{\text{в}}}{dE_t} = -a_1 - 2a_2(E_t - E_{\text{м}})^2 - 3a_3(E_t - E_{\text{м}})^3 = 0 \quad (18)$$

и, следовательно, $\alpha_1 = 0$.

Разность ординат верхней и нижней ветвей петли гистерезиса $\Delta D = (D_{\text{в}} - D_{\text{н}})$ определяет ширину петли гистерезиса при мгновенных значениях E_t :

$$\Delta D = 2 \left\{ D_{\text{м}} - a_2(E_{\text{м}}^2 + E_t^2) - a_3(E_{\text{м}}^3 + 3E_{\text{м}}^2 E_t) \right\}. \quad (19)$$

Площадь петли гистерезиса в этом случае определяется выражением:

$$F = 2 \int_0^{E_{\text{м}}} \Delta D \cdot dE. \quad (20)$$

Подставив значение ΔD из (19) в уравнение (20), получим выражение для удельной энергии потерь на переполяризацию, численно равной площади петли гистерезиса с учётом масштабных коэффициентов:

$$W_{\text{пуд}} = 2 \left[D_{\text{м}} E_{\text{м}} - \frac{4}{3} E_{\text{м}}^2 a_2 - \frac{7}{4} E_{\text{т}}^4 a_3 \right]. \quad (21)$$

По известному значению удельной энергии потерь $W_{\text{пуд}}$, рассчитанному по результатам измерения $\text{tg}\delta$ и C (8), из выражения (21) можно определить коэффициенты a_2 и a_3 уравнения, описывающего петлю гистерезиса.

В приведённых преобразованиях использовались только два параметра, и поэтому никакой дополнительной информации получить от найденных значений коэффициентов a_2 и a_3 невозможно. Однако из уравнения верхней ветви петли гистерезиса (16), приняв в нем $E_t = 0$, получим выражение для определения остаточной индукции электрического поля:

$$D_0 = -a_2 \cdot (E_{\text{м}})^2 - \frac{2 \cdot a_2 \cdot E_{\text{м}}^2 - D_{\text{м}}}{4 \cdot E_{\text{м}}^2} \cdot (E_{\text{м}})^3. \quad (22)$$

Так как площадь петли гистерезиса рассчитана для случая, при котором все потери обусловлены суммарными процессами электропроводности, то этому же случаю соответствует и полученное значение остаточной индукции электрического поля.

По методу, описанному в [6], можно экспериментальным путём определить значение индукции D_0 , соответствующее только потерям на переполяризацию.

Площадь расчётной петли гистерезиса при постоянной длине пропорциональна её ширине, поэтому энергия потерь за счёт переполяризации $W_{\text{удр}}$ определяется выражением:

$$W_{\text{удр}} = \frac{W_{\text{удп}} D_{0p}}{D_{0п}} W, \quad (23)$$

где $D_{0п}$ – полная электрическая индукция равная D_0 ;

D_{0p} – электрическая индукция, идущая на переполаризацию, определяемая экспериментально.

Удельная энергия потерь за счёт электронной проводимости $W_{\text{удэ}}$ определяется выражением:

$$W_{\text{удэ}} = W_{\text{пуд}} - W_{\text{удр}}. \quad (24)$$

Соответственно при замене параллельной эквивалентной схемы замещения (рисунок 1б) на схему, приведённую на рисунке 2, сопротивление потерь на переполаризацию:

$$R_{\text{пп}} = R \frac{D_{0п}}{D_{0p}} = \frac{R_{\text{пп}} R_э}{R_{\text{пп}} + R_э} \cdot \frac{D_{0п}}{D_{0p}}, \quad (25)$$

а сопротивление потерь на электропроводность:

$$R_э = \frac{R_{\text{пп}} R}{R_{\text{пп}} - R}. \quad (26)$$

Таким образом, можно разделить диэлектрические потери на потери от электропроводности $W_{\text{удэ}}$ и потери на переполаризацию $W_{\text{удр}}$. Эти потери имеют различные механизмы и поэтому позволяют получить дополнительную информацию о свойствах жидкого диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник [Текст] / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник для вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – В 3-х т. Том 1. – СПб.: Питер, 2004. – 377 с.
3. Физика: Энциклопедия [Текст] / Под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 2003.
4. Физические величины: справочник [Текст] / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. [Текст] / Д.В. Сивухин. – В 3-х т.; т. III. – М.: Наука, 1986.
6. Расовский, Э.И. Электротехника в рисунках и чертежах в 2-х частях [Текст] / Э.И. Расовский, П.Ф. Скворов, Щ.М. Алукер, И.А. Васильева. – М.: Госэнергоздат, 1951.

Корндорф Сергей Фердинандович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (0862)419876

E-mail: pms@ostu.ru

Ногачёва Татьяна Ивановна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент

Тел. (0862)419876

E-mail: pms@ostu.ru

Давыдова Надежда Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,

Тел. (0862)419876

E-mail: pms@ostu.ru

УДК 662.927

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, О.С. ПЕТРОВА

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Обоснован выбор принципа построения датчика температуры для устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении лечебно-профилактического учреждения; представлено описание оригинального датчика, результаты его теоретического и экспериментального исследования.

The choice of a principle of construction of the gauge of temperature for the device of the control and regulation of temperature of air is proved in treatment-and-prophylactic establishment; the description of the original gauge, results its theoretical and an experimental research is submitted.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В помещении лечебно-профилактического учреждения (ЛПУ) СНиПом 2.08.02-89 регламентируется температура воздуха от 18 до 25°C в зависимости от его назначения. В России 80% ЛПУ оборудованы однетрубными системами отопления, поэтому для поддержания температуры воздуха в помещении на заданном уровне необходима регулирующая арматура с низким коэффициентом гидравлического сопротивления, которая устанавливается у отопительных приборов.

В ОрелГТУ разработано устройство [1], позволяющее в автоматическом режиме контролировать и регулировать температуру воздуха в помещениях ЛПУ в зависимости от его назначения. Предложенное устройство состоит из двух основных узлов: устройства контроля и устройства регулирования. Устройство регулирования выполнено с наклонной перегородкой, что позволяет снизить коэффициент гидравлического сопротивления до требуемого по ГОСТ 10944-75 значения.

Основным элементом устройства контроля является датчик температуры, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- диапазон контролируемых температур 16..27 °С;
- малые габариты;
- развивать достаточное усилие для регулирования;
- не должен сильно изменять свои свойства под влиянием внешних условий.

Разработке такого датчика и посвящена настоящая работа.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПА ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКА

Известны датчики температуры отечественных производителей, таких как ОАО «Теплоконтроль», ЗАО «РОСМА», «Кипарис», «Техноком-ОСТ», ООО «ФОМАКО», ООО «Удар», ООО «Приборика», ОАО «Теплоконтроль», а также датчики температуры по полезным моделям №36149, № 36516, № 34730, АС СССР №648798, АС СССР № 2018097, АС СССР № 1840344, АС СССР № 1835494, АС СССР № 1814034, АС СССР № 1040350, АС СССР № 970130, АС СССР № 864023, патент РФ №2017086, и зарубежных фирм «WIKА Alexander Wiegand GmbH & Co.KG» (Германия), KFM S.A. (Польша), «Aplisens» (Польша), «Gasli Aldiso» (Испания), «Raytek» (США), «Danfoss» (Дания), «HERZ» (Австрия), «Heimeier» (Германия), «MNG» (Германия), «Mertic» (Германия), «Emerju» (Франция), «САР» (Франция), «Termis» (Финляндия). В устройствах контроля этих фирм применяются в качестве чувствительных элементов датчики температуры, причем в фирмах ООО «Приборика», «Кипарис», ЗАО «РОСМА», «Heimeier» (Германия), KFM S.A. (Польша), «WIKА Alexander Wiegand GmbH & Co.KG» (Германия), полезной модели №36149, № 36516, № 34730, АС СССР №648798, АС СССР № 2018097, АС СССР № 1840344, АС СССР №

1835494, АС СССР № 1814034, АС СССР № 1040350, АС СССР № 970130, АС СССР № 864023 и патенте РФ № 2017086 применяются датчики температуры прямого действия, а в фирмах «Кипарис», ООО «ФОМАКО», ООО «Удар», ОАО «Теплоконтроль», ЗАО «Приборкомплект», «Raytek» (США), «WIKА Alexander Wiegand GmbH & Co.KG» (Германия) и полезной модели № 36149 – датчики температуры непрямого действия.

Датчики температуры непрямого действия имеют ряд недостатков по сравнению с датчиками температуры прямого действия. Так, например, они требуют наличия исполнительного механизма и дополнительного источника питания, а также квалифицированных специалистов для монтажа. Исполнительный механизм и источник питания увеличивают размеры датчика. Таким образом, датчик температуры непрямого действия не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к чувствительному элементу устройства контроля и регулирования.

Среди датчиков температуры прямого действия различают манометрические, биметаллические и дилатометрические. Дилатометрические датчики из-за конструктивных особенностей имеют очень большую длину, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к датчику температуры устройства контроля (АС СССР № 648798, АС СССР № 1840344, АС СССР № 1814034, полезная модель № 34730). Недостатками биметаллических датчиков являются малые перестановочные усилия и слабая устойчивость к механическим повреждениям, вибрациям и тряске (полезная модель № 36516, АС СССР № 1835494).

Манометрические датчики температуры прямого действия способны обеспечить достаточные усилия и перемещения при небольших габаритных размерах, работать при любых соотношениях температур баллона и корпуса чувствительного элемента и их статическая характеристика линейна (АС СССР № 864023, АС СССР № 970130, АС СССР № 1040350, АС СССР № 2018097). Таким образом, требованиям, предъявляемым к датчику температуры устройства контроля и регулирования, удовлетворяет манометрический датчик температуры прямого действия, который и выбирается в качестве чувствительного элемента устройства контроля.

Среди манометрических датчиков температуры прямого действия в зависимости от вида наполнителя выделяют: датчики температуры с газовым, парожидкостным, жидкостным и твердым наполнителем. Датчики температуры с газовым наполнителем имеют низкий температурный коэффициент и чувствительны к изменению барометрического давления и температуры. Недостатком датчиков с парожидкостным наполнителем является погрешность от гидростатического давления наполнителя, появляющаяся при заполнении датчика, а также значительный размер их баллона. Датчики температуры с жидкостным наполнителем позволяют развивать большие полезные нагрузки на штоке, однако серьезным их недостатком является слабая устойчивость к вибрациям, механическим повреждениям и тряске.

Достоинством манометрических датчиков температуры с твердым наполнителем является их работоспособность при любых соотношениях температур баллона и корпуса чувствительного элемента, большие перемещения при малом количестве наполнителя, повышенная устойчивость к ударам, вибрациям и тряске, простота конструкции, малые габаритные размеры и масса. Такие датчики мало подвержены влиянию давления среды, поэтому они широко используются в приборах, а также в качестве самостоятельных силовых термоэлементов различных объектов и систем [3, 4].

Таким образом, для разрабатываемого устройства контроля [1] выбирается манометрический датчик температуры с твердым наполнителем, поскольку он удовлетворяет указанным выше требованиям, при небольших габаритах обеспечивает значительный ход штока (до 9,5 мм) [2] за счет свойств твердого наполнителя (воск) и максимальное усилие. Широкое распространение датчики температуры с твердым наполнителем получили в качестве чувствительных элементов устройства контроля таких зарубежных фирм, как «Danfoss» (Дания), «HERZ» (Австрия), «Heimeier» (Германия), «MNG» (Германия), «Mertic» (Германия), «Emerju» (Франция), «CAP» (Франция), «Termis» (Финляндия) [4]. Одно из ведущих предприятий отечественной промышленности по выпуску таких датчиков – ЗАО «ОРЛЭКС».

ОПИСАНИЕ ДАТЧИКА И ИССЛЕДОВАНИЙ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

В качестве прототипа датчика использовалась известная конструкция серийно выпускаемого ЗАО «ОРЛЭКС» датчика температуры. Проведенные авторами исследования позволили выполнить модернизацию этого датчика, направленную на улучшение его метрологических характеристик – снижение гистерезиса и увеличение хода штока [2]. Схема предлагаемого датчика представлена на рисунке 1.

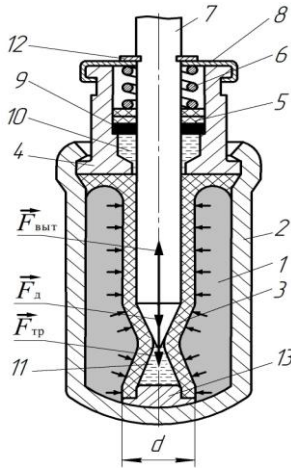


Рисунок 1– Датчик температуры:

- 1 – наполнитель; 2 – корпус; 3 – втулка из упругого материала;
 4 – втулка; 5 – прокладка; 6 – пружина; 7 – шток; 8 – защитный колпак;
 9 – сальник; 10 – переменная емкость; 11 – дополнительная переменная емкость;
 12 – стопорная шайба; 13 – заглушка

Датчик работает следующим образом. При повышении температуры контролируемой среды объем термореактивного наполнителя 1 увеличивается (воск плавится). При этом возрастает давление на втулку 3 из упругого материала. Это приводит к ее сжатию и выталкиванию штока 7. При понижении температуры контролируемой среды давление в датчике снижается, при этом втулка 3 из упругого материала разжимается и шток 7 под действием пружины 6 возвращается в исходное положение.

В работах Тимошенкова К.Д. описана работа прототипа датчика температуры, статическая характеристика которого выглядит следующим образом [3]:

$$\Delta h = \left\{ \frac{m_i}{100} \left[\frac{M_i \cdot \beta_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{(100 - M_i) \cdot \beta_i}{\rho_i} \right] - \left[\frac{\pi \cdot d_{\text{а}}^2}{4} \cdot (H_{\text{е}} + h_{\text{е}}) - \left(\frac{\pi \cdot d_{\text{об}}^2}{4} \cdot H_{\text{а}} + \frac{\pi \cdot d_{\text{об}}^2}{12} \cdot h_{\text{а}} \right) \right] \cdot (K_{\text{с}} - \beta_{\text{а}}) - \left(\frac{\pi \cdot d_{\text{е}}^2}{4} \cdot H_{\text{е}} + \frac{\pi(d_{\text{е}}^2 - d_{\text{а}}^2)}{12} \cdot h_{\text{е}} \right) \cdot \alpha_i \right\} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_{\text{об}}^2} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Δh – ход штока; $m_{\text{н}}$ – масса наполнителя; $M_{\text{н}}$ – соотношение компонентов в смеси; $\beta_{\text{ц}}$, $\beta_{\text{м}}$, $\beta_{\text{в}}$ – коэффициенты объемного расширения церезина, металлического компонента и резиновой втулки соответственно; $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{м}}$ – плотность церезина и металлического компонента; $d_{\text{к}}$, $d_{\text{в}}$, $d_{\text{шт}}$ – диаметры корпуса, резиновой втулки и штока; $H_{\text{к}}$, $h_{\text{к}}$ – высота цилиндрической и конической части корпуса; $K_{\text{с}}$ – коэффициент сжатия резиновой втулки ($K_{\text{с}} = 0,22 \dots 0,035$), определяется в зависимости от соотношения объемов церезина и металлического компонента; $H_{\text{в}}$, $h_{\text{в}}$ – высота цилиндрической и конической части резиновой втулки; $\alpha_{\text{м}}$ – коэффициент линейного расширения металла корпуса; Δt – изменение температуры.

Учитывая, что коэффициенты объемного расширения резиновой втулки $\beta_{\text{в}}$ и линейного расширения металла корпуса $\alpha_{\text{м}}$ значительно меньше такого для наполнителя [3, 4], выражение (1) без учета влияния величин второго и выше порядков малости можно представить в виде:

$$\Delta h = \frac{12,4 \cdot 10^{-3} m_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}} \cdot \beta_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}} \pi \cdot d^2} \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Сравнение полученных по формуле (2) статических характеристик прототипа (рисунок 2, а) и датчика предлагаемой конструкции (рисунок 2, б) с полученными авторами ранее экспериментальными зависимостями [2] показывает, что известное теоретическое

описание не в полной степени отражает физические процессы, происходящие в датчике температуры.

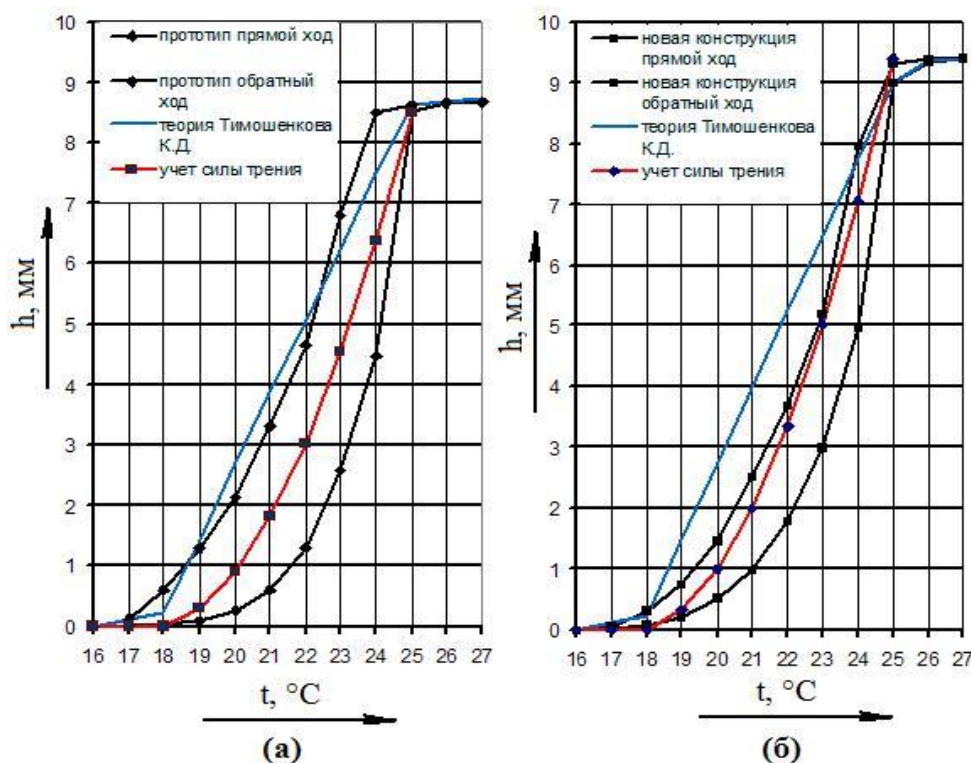


Рисунок 2 – Экспериментальные и теоретические зависимости для статических характеристик датчика температуры:
(а) прототип; (б) разработанной конструкции

Предложена теоретическая модель, описывающая работу датчика с учетом изменения силы давления пружины и силы трения штока о втулку от перемещения штока. На рисунке 1 показаны силы, действующие на шток датчика при его движении.

Очевидно, что при любом положении штока справедливо равенство:

$$F_{\text{выт}} = F_{\text{д}} + F_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{выт}}$ – сила выталкивания штока; $F_{\text{д}}$ – сила давления пружины; $F_{\text{тр}}$ – сила трения штока о втулку.

Датчик предварительно поджат с силой F_0 ($F_0 = 45$ Н) за счет пружины. Поэтому сила давления $F_{\text{д}}$ при ходе штока Δh может быть определена, как:

$$F_{\text{д}} = F_0 + k \cdot \Delta h, \quad (4)$$

где k – жесткость пружины ($k = 10$ Н/мм)

Сила трения $F_{\text{тр}}$ направлена против движения и может быть определена, как:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения ($\mu = 0,15$); N – сила нормального давления, направленная по нормали к движению штока.

Для определения N воспользуемся выражением

$$N = p \cdot S_N = p \pi d_{\text{шт}} (h - \Delta h), \quad (6)$$

где p – давление в датчике; S_N – площадь боковой поверхности штока, взаимодействующая со втулкой; h – начальная высота участка штока, взаимодействующего со втулкой.

Сила выталкивания штока $F_{\text{выт}}$ возникает за счет приращения объема наполнителя датчика температуры в результате увеличения температуры и действует на резиновую втулку, которая сжимается, выталкивая шток:

$$F_{\text{выт}} = p \cdot S = p \cdot \pi \cdot d^2 / 4. \quad (7)$$

Подставляя значения величин из (4) – (7) в (3) с учетом выражений (1) и (2) можно получить выражение для статической характеристики датчика. На рисунке 2 для прототипа и предлагаемой конструкции датчиков температуры показаны, наряду с экспериментальными и теоретическими характеристиками по формуле К.Д. Тимошенкова, также теоретические характеристики по разработанной модели.

Из рисунка видно, что полученные теоретические характеристики не выходят за рамки экспериментальных и наиболее достоверно отражают реальную характеристику датчика температуры.

ВЫВОДЫ

1. Для разработки устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещениях лечебно-профилактических учреждений обоснован выбор манометрического датчика температуры с твердым наполнителем.
2. Предложена оригинальная конструкция датчика температуры, обладающего, по сравнению с аналогами, улучшенными метрологическими характеристиками.
3. Предложен и апробирован подход к моделированию датчика температуры, обеспечивающий более адекватное описание его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2302031 РФ, МКИ G 05 D 23/02. Регулятор температуры [Текст]/ С.А. Чистович, С.П. Петров, А.И. Суздальцев, О.С. Петрова. – Оpubл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
2. Подмастерьев, К.В. Экспериментальные исследования статической характеристики датчика температуры устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении лечебно-профилактического учреждения [Текст]/ К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова // Известия ОрелГТУ. - 2008. - №2.
3. Тимошенков, К.Д. Датчики температуры с твердым наполнителем [Текст]/К.Д. Тимошенков // Библиотека приборостроителя. – М.: Машиностроение, 1975. – 138 с.
4. Фрайден, Дж. Современные датчики [Текст]: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Заявка на полезную модель № 2008110582 от 19.03.2008. Датчик температуры [Текст]/ К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова, С.П. Петров. – Положительное решение от 28.04.2008.
6. Яворский, Б. М. Справочник по физике [Текст] / Б.М. Яворский, А.А. Дельтлаф. – М.: «Наука», 1968. – 940 с.

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419821
E-mail: E-mail: pms@ostu.ru

Петрова Ольга Сергеевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876
E-mail: E-mail: lavanda777@bk.ru

УДК 620.179.42

П.Н. ШКАТОВ, Д.В. БЫДАНОВ, А.В. БИРЮКОВ

РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

С целью обучения и аттестации специалистов в области неразрушающего вихретокового контроля разработан программно-аппаратный комплекс для персонального компьютера (тренажер), который позволяет имитировать работу с различными моделями приборов, вихретоковыми преобразователями и объектами контроля.

With the purpose of training and certification of experts in the field of non destructive eddy current testing is developed a hardware-software complex for a personal computer (simulator) which allows simulating work with various models of devices, eddy current by converters and objects of the control.

Обучение специалистов вихретокового контроля должно проводиться в специально оборудованных для этого лабораториях. Лаборатории, кроме парка приборов с различными вихретоковыми преобразователями (ВТП), должны иметь и большое число образцов с натурными дефектами. Такие образцы уникальны, зачастую имеют значительные габариты. Стоимость оборудования, требуемого по существующим правилам подготовки специалистов, весьма велика, и оно должно отражать специфику объектов той отрасли, по которой подготавливается специалист.

Из этого следует, что иметь в наличии все требуемые для обучения модели приборов, ВТП, а также разновидности образцов дефектов для любой лаборатории весьма сложно. Поэтому возникает проблема обучения специалиста работе с прибором, определенным ВТП и объектом контроля (ОК) (или с каким-либо их сочетанием), которые на момент обучения отсутствуют в лаборатории.

Для решения данной проблемы разработан программно-аппаратный комплекс для персонального компьютера (тренажер), который позволяет имитировать работу с различными моделями приборов, вихретоковыми преобразователями и объектами контроля. Комплекс позволяет проводить обучение специалистов работе с оборудованием (прибор, вихретоковый преобразователь), которое на момент обучения отсутствует в лаборатории, а также проектировать виртуальные приборы и моделировать образцы дефектов. С помощью данного программно-аппаратного комплекса возможно проведение аттестации специалистов вихретокового контроля. Также комплекс позволяет виртуально собирать приборы из составляющих блоков, задавая возможности и параметры прибора. Это дает дополнительные возможности по проектированию приборов вихретокового неразрушающего контроля.

Тренажер представляет собой комплекс аппаратных и программных средств. Аппаратные средства – это сканирующее устройство, имитатор вихретокового преобразователя, имитатор вихретокового дефектоскопа, которые соединяются с персональным компьютером, на котором установлена программная часть комплекса, по интерфейсам USB и RS-232. Программные средства – это модульная программная система, использующая в качестве хранилища информации реляционную базу данных. Структурная схема тренажера представлена на рисунке 1.

Сканирующее устройство предназначено для снятия сигналов с реального образца дефекта с последующим сохранением их в базе данных тренажера. Устройство соединяется с персональным компьютером с помощью двух последовательных портов (интерфейс RS-232).

Имитатор вихретокового преобразователя представляет собой устройство, разработанное на основе планшета с пером и предназначенное для имитирования работы с вихретоковым преобразователем. Данное устройство соединяется с персональным компьютером по интерфейсу USB.

0

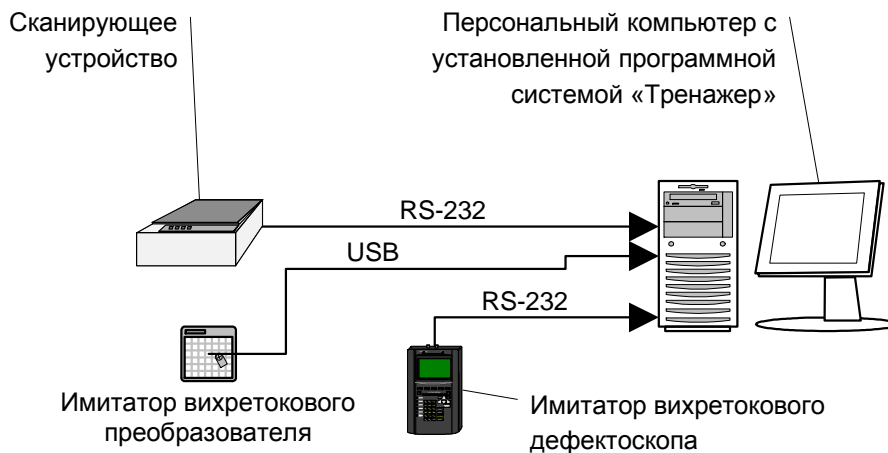


Рисунок 1 – Структурная схема тренажера

Имитатор вихретокового дефектоскопа представляет собой прибор, разработанный на основе реального вихретокового дефектоскопа. Соединяется с персональным компьютером по интерфейсу RS-232.

Сканирующее устройство предназначено для покоординатного снятия сигналов с образцов дефектов с последующим их сохранением в базе данных тренажера. Структурно устройство состоит из трех основных компонентов: устройства, разработанного на основе плоттера, и вихретокового дефектоскопа с вихретоковым преобразователем.

В качестве плоттера используется модель DXY-1350A компании Roland. На столешнице плоттера закрепляется образец дефекта. Вместо пера на плоттере закреплен вихретоковый преобразователь. Управляемый программно плоттер осуществляет перемещение преобразователя в заданные координаты образца дефекта.

В качестве вихретокового дефектоскопа используется серийно выпускаемый прибор «ЗОНД ВД-96», предназначенный для выявления трещин, коррозии, несплошностей и неоднородностей в поверхностном слое черных и цветных металлов.

К основным особенностям данного прибора можно отнести высокую чувствительность к подповерхностным трещинам (глубина залегания до 5 мм), выявление дефектов под слоем любого диэлектрического покрытия и/или ржавчины, возможность использования различных типов вихретоковых преобразователей, отстройка в широком диапазоне от влияния мешающих факторов.

В качестве вихретокового преобразователя используется вихретоковый преобразователь УВТП 10×30, выпускаемый серийно и совместимый с вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96».

Плоттер и вихретоковый дефектоскоп подключаются к персональному компьютеру по последовательным портам (интерфейс RS-232). Управление плоттером и дефектоскопом осуществляет модуль «Сканирующее устройство» программного комплекса «Тренажер».

Поддерживаются два режима сканирования: ручной и автоматический. При ручном сканировании оператор задает координаты точки на образце дефекта, плоттер перемещает вихретоковый преобразователь в точку с заданными координатами, сигналы от преобразователя поступают в дефектоскоп и далее в компьютер, затем происходит сохранение результата в базе данных тренажера. В автоматическом режиме оператор задает диапазон координат и дискретность сканирования. Система производит сканирование образца в заданном диапазоне координат с заданной дискретностью и сохраняет результаты в базу данных тренажера. На рисунке 2 приведен снимок экрана при сканировании в автоматическом режиме.

Здесь видны текущее положение преобразователя относительно образца дефекта, полная область сканирования, уже отсканированная часть, текущие координаты преобразователя на образце дефекта, значения реальной и мнимой составляющих сигнала, время сканирования прошедшее и оставшееся.

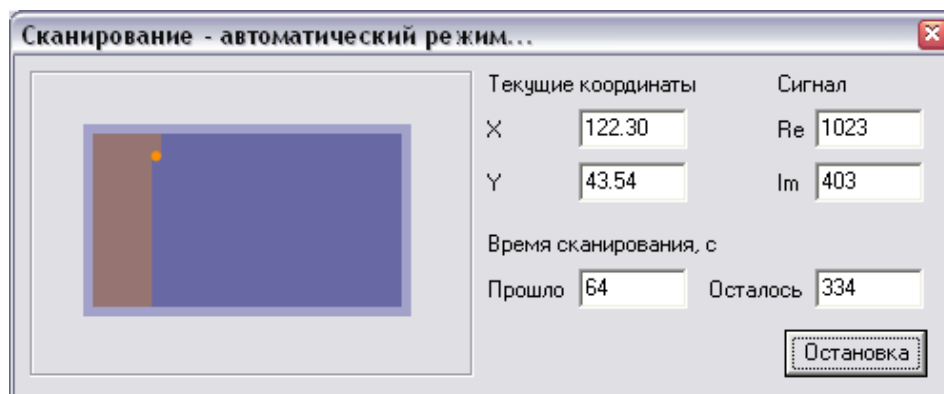


Рисунок 2 – Сканирование в автоматическом режиме

Описанная система для сканирования позволяет снимать сигналы с различных образцов дефектов, используя различные вихретоковые преобразователи, совместимые с вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96». Используя различные преобразователи, а также изменяя настройки прибора, можно получать различные массивы сигналов для последующего использования. Т.е. используя один образец дефекта, один вихретоковый преобразователь, по-разному настраивая дефектоскоп, можно получить массив сигналов, каждый срез которого будет соответствовать определенным настройкам прибора. В совокупности с программным модулем «Сканирующее устройство» система предоставляет удобный инструмент для создания базы данных сигналов, снятых с реальных образцов дефектов и соответствующих различным вихретоковым преобразователям с различными настройками вихретокового дефектоскопа.

Имитатор вихретокового преобразователя предназначен для имитирования работы с вихретоковым преобразователем. Имитатор представляет собой планшет с пером. Данное устройство позволяет имитировать работу с вихретоковым преобразователем. Для пользователя тренажера перо является преобразователем, а планшет образцом дефекта. Пользователь перемещает перо по планшету подобно перемещению вихретокового преобразователя по образцу дефекта. Это позволяет научить пользователя работе с вихретоковым преобразователем, не имея его в наличии. Планшет подключается к персональному компьютеру по интерфейсу USB. Программная обработка сигналов от планшета осуществляется в модуле «Моделирование процесса контроля» программного комплекса «Тренажер».

Программная часть тренажера представляет собой модульную программную систему для персонального компьютера для работы под управлением операционной системы Windows, использующая в качестве хранилища информации реляционную базу данных. Программа имеет модульную структуру, что позволяет без труда расширять ее возможности путем подключения новых модулей. Вся информация хранится в реляционной базе данных, что предоставляет легкий доступ к ней и быстрый поиск необходимых данных. Структурная схема программного комплекса изображена на рисунке 3. Из рисунка видно, что структурно весь программный комплекс состоит из 4 компонентов: базовый модуль (ядро системы), прикладных модулей системы, СУБД и справочников.

Режимы тренажера делятся в зависимости от направления потока данных на:

- ввод данных (с помощью сканирующего устройства либо используя моделирование результатов контроля);
- обработка данных (с помощью моделирования процесса контроля);

– просмотр данных (с помощью построителя отчетов, графиков диаграмм).

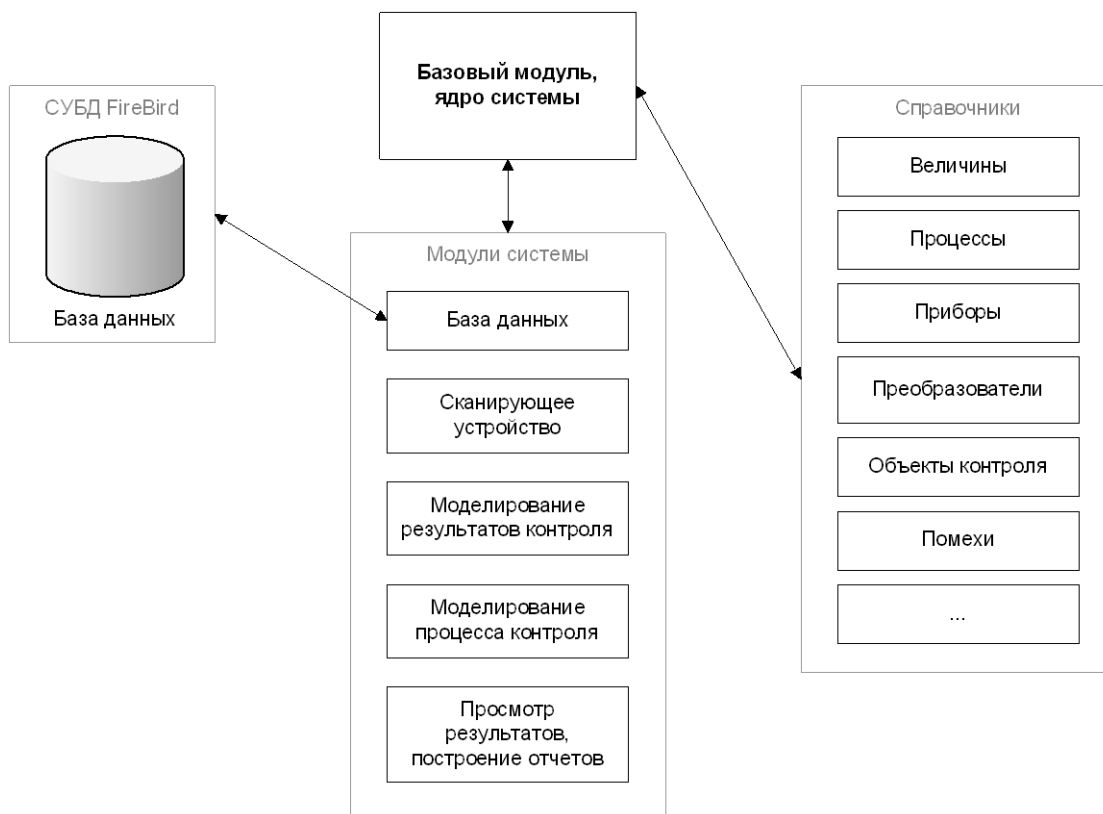


Рисунок 3 – Структурная схема программного комплекса «Тренажер»

Моделирование процесса контроля может происходить в трех режимах:

Виртуальный режим. В данном режиме работа происходит с виртуальным прибором, виртуальным вихретоковым преобразователем, виртуальным объектом контроля. Пользователь задает вид и параметры прибора, параметры вихретокового преобразователя, параметры объекта контроля (параметры дефектов), наличие, вид и параметры шума, а также объем расчетов. По заданной информации комплекс моделирует прибор, ВТП, их взаимодействие, т.е. процесс контроля, рассчитывает результаты и представляет их в заданном виде. В данном режиме все составляющие процесса контроля, такие как прибор, ВТП, ОК являются виртуальными. Режим позволяет виртуально собирать приборы из составляющих блоков, задавая возможности и параметры прибора. Это дает дополнительные возможности по проектированию приборов вихретокового неразрушающего контроля. Схема режима приведена на рисунке 3.

Моделирование процесса контроля с использованием ранее снятой с определенного образца дефекта информации. В данном режиме используются ранее записанные и сохраненные в базе данных комплекса сигналы, снятые определенным ВТП с определенного ОК. Пользователь определяет параметры прибора (частота, фаза, усиление и т.п.), параметры и наличие шумов. В данном режиме программа отображает объект контроля, по которому пользователь перемещает вихретоковый преобразователь (указатель мыши). Сигнал отображается, к примеру, на комплексной плоскости. Данный режим характерен тем, что при работе используются сигналы, снятые с реальных объектов контроля. Схема режима приведена на рисунке 4.

Режим работы с реальным образцом дефекта. В данном режиме пользователь работает с реальным образцом дефекта. Сигналы, получаемые при сканировании, обрабатываются комплексом и затем отображаются в заданном виде. В данном режиме возможно введение виртуальных помех, зазора и т.п.

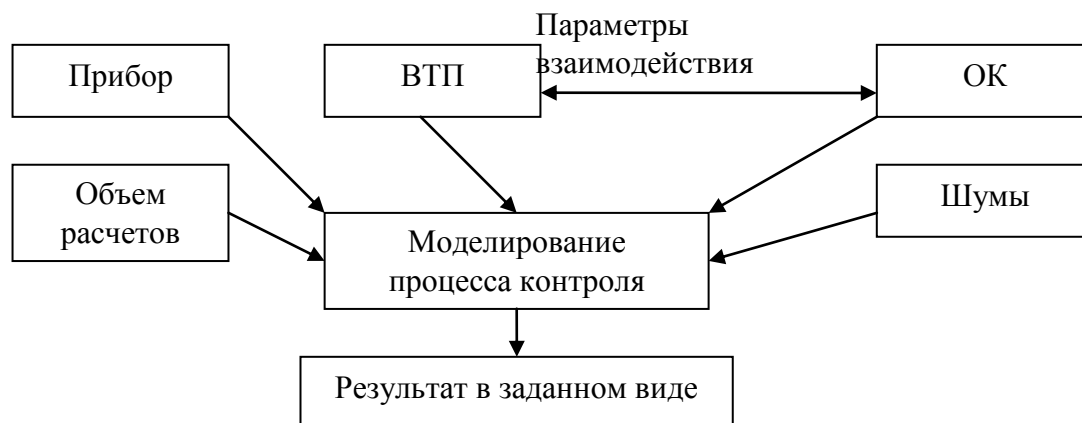


Рисунок 4 – Режим 1

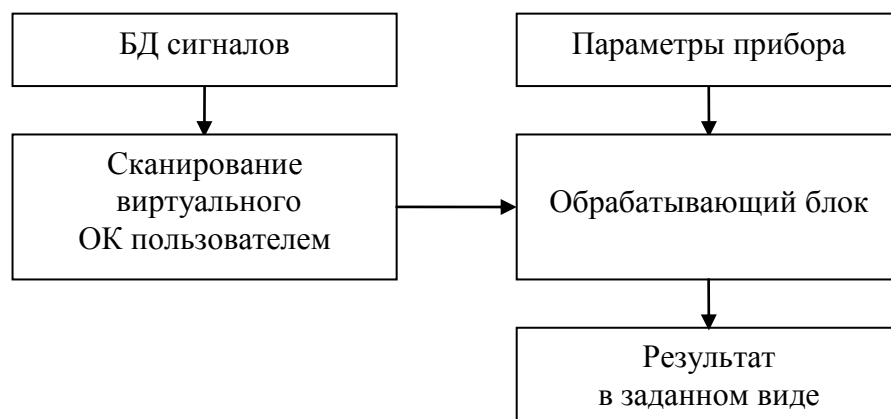


Рисунок 5 – Режим 2

Описанный тренажер позволяет обучать и сертифицировать специалистов вихретокового контроля в лабораториях, не имеющих в наличии необходимых для обучения приборов, преобразователей и объектов контроля. Тренажер может быть использован как для обучения и сертификации специалистов вихретокового контроля, так и для проектирования приборов неразрушающего вихретокового контроля.

Шкатов Петр Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
 Доктор технических наук, профессор, декан факультета «Интеллектуальные информационные системы»
 Тел.(8495)268-76-94
 E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Быданов Денис Викторович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
 Аспирант

Бирюков Александр Васильевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
 Кандидат технических наук, докторант

УДК 620.179.1.082.7:658.58

М.Г. ЗАХАРОВ

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПАРАМЕТРА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Показана разработка интегрального комплексного диагностического параметра, характеризующего относительную квазифактическую площадь контакта рабочих поверхностей трисопряжений. Рассмотрена физическая сущность предложенного параметра, область его определения.

Development of integrated complex diagnostic parameter of contact of working surfaces of pairs friction describing the relative actual area is shown. The physical essence of the developed parameter, a range of definition is considered.

Техническое состояние трисосистем различного назначения в значительной мере определяется режимом смазки их рабочих поверхностей [1]. Разработка диагностического параметра, высокочувствительного к режимам смазки, и является целью данной работы.

В случае функционирования трисосистемы в режиме смешанной смазки возможны кратковременные местные разрушения пленки смазочного материала, приводящие к микроконтактированию поверхностей трения. В течение определенного времени поверхности полностью разделены пленкой смазочного материала (жидкостная смазка), а при микроконтактировании взаимодействуют непосредственно (граничная смазка). Наиболее благоприятным режимом смазки для трисосопряжения является жидкостная, а наименее – граничная. При этом процессы, протекающие в зонах нагружения рабочих поверхностей трисосопряжения, и характер их износа принципиально различны.

В режиме граничной смазки состояние трисосопряжения в значительной степени определяется суммарной площадью микроконтактов, по которым в основном распределяется нагрузка и происходит интенсификация всех видов износа. При жидкостной смазке наблюдаются флуктуации толщины смазочной пленки, разделяющей поверхности трения, под воздействием ряда внутренних и внешних факторов и в конечном итоге приводящие к различным видам усталостного износа. Поэтому в режиме жидкостной смазки состояние объекта целесообразно характеризовать толщиной пленки смазочного материала, разделяющего рабочие поверхности, или ее изменениями, а в режиме граничной смазки – суммарной площадью микроконтактов или связанными с этой площадью параметрами.

В связи с тем, что наиболее интенсивный износ взаимодействующих поверхностей происходит при микроконтактировании, работоспособность трисосопряжения при полужидкостной смазке наиболее целесообразно характеризовать, в первую очередь, параметрами микроконтактирования его рабочих поверхностей. К таким параметрам относятся, например, частота, длительность и число микроконтактов. Однако наиболее полную интегральную характеристику взаимодействия рабочих шероховатых поверхностей позволяет получить параметр, характеризующий общую фактическую площадь контакта (ФПК) [2, 3].

Характер взаимодействия контактирующих поверхностей зависит от случайного сочетания большого числа факторов, предопределяющего случайность процесса микроконтактирования. Это, в свою очередь, приводит к случайным изменениям ФПК при более значительном рассеянии значений по сравнению с усредненными параметрами при одинаковых условиях, что указывает на предпочтительное использование усредненных характеристик ФПК.

В качестве смазок часто применяются материалы, обладающие низкой удельной проводимостью. Очевидно, что даже незначительное изменение режима смазки приводит к значительным изменениям в широких пределах проводимости зоны трения $G(t)$, которая по указанным ранее причинам носит случайный характер и при граничной смазке характеризует

случайные изменения ФПК [3]. Таким образом, диапазон изменения проводимости $G_b(t)$ зоны трения при граничной смазке в значительной степени определяется диапазоном изменения ФПК рабочих поверхностей. В случае, когда ФПК не может существенно измениться при увеличении нагрузки, проводимость зоны трения, соответствующая граничной смазке, велика и стремится к своему максимально возможному значению $G_{b,max}$. Минимальное значение проводимости $G_{b,min}$ зоны трения соответствует одному микроконтакту с минимально возможной ФПК.

Известно, что не вся ФПК одинаково электропроводна. Это объясняется отсутствием или наличием покрывающих пленок разной физической природы, а также участков с туннельной проводимостью. В связи с этим в первом приближении принято считать, что электропроводность ФПК определяется сопротивлением стягивания, а электрическим параметром, используемым в качестве диагностического, с помощью которого можно характеризовать ФПК, является средняя проводимость [1, 4, 5].

Режим жидкостной смазки характеризуется отсутствием микроконтактирования и наблюдается при толщинах пленки смазочного материала, превышающих суммарную высоту наиболее высоких микронеровностей поверхностей трения. Проводимость зоны трения $G_f(t)$ при максимально возможной толщине пленки смазочного материала принимает минимальное значение $G_{f,min}$. Максимальное значение проводимости $G_{f,max}$ соответствует минимальной толщине пленки смазочного материала, предшествующей микроконтактированию.

Для режима смешанной смазки проводимость зоны трения G_{mix} определяется взаимным шунтированием проводимостей G_b и G_f , отождествляемых с граничной и жидкостной смазкой соответственно:

$$G_{mix} = G_b + G_f.$$

На основании сказанного в общем случае мгновенная проводимость зоны трения может быть выражена в виде:

$$G = \begin{cases} G_b, & h_{wzg} \leq 1; \\ G_{mix}, & h_{wzg} \leq 5; \\ G_f, & 5 \leq h_{wzg} \leq 100, \end{cases} \quad (1)$$

где h_{wzg} – относительная толщина смазочного слоя [6].

Проводимость зоны трения в режиме граничной и смешанной смазки существенно превышает проводимость зоны трения при жидкостной смазке, т.е. $G_b > G_{mix} \geq G_f$ [1]. В свою очередь, проводимость в режиме смешанной смазки в основном зависит от проводимости зон с граничным трением, поэтому выражение (1) можно преобразовать:

$$G \cong \begin{cases} G_b, & h_{wzg} \leq 5; \\ G_f, & 5 \leq h_{wzg} \leq 100. \end{cases} \quad (2)$$

Принимая во внимание уровень проводимости $G_{b,min}$, соответствующий переходу одного режима смазки в другой, представим среднюю проводимость зоны трения, как последовательное сочетание импульсов проводимости, характеризующих режимы граничной и жидкостной смазки:

$$\bar{G} = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t_{ij}}^{t_{kj}} G_b(t) dt}{\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{ij})} + \frac{\sum_{l=1}^m \int_{t_{il}}^{t_{kl}} G_f(t) dt}{\sum_{l=1}^m (t_{kl} - t_{il})}, \quad (3)$$

где T – время усреднения диагностического признака;

$G_b(t)$, $G_f(t)$ – мгновенные значения составляющих проводимости для смешанной (граничной) и жидкостной смазки соответственно;

j, l – номер импульса составляющих проводимости с начала момента измерения;

$t_{ij}, t_{kj}, t_{nl}, t_{kl}$ – моменты начала и окончания j, l , - го импульса;

$\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{ij}), \sum_{l=1}^m (t_{kl} - t_{nl})$ – суммарная длительность импульсов проводимости при

граничной (смешанной) и жидкостной смазке соответственно.

Проводимость зоны трения, соответствующая граничной смазке, как было ранее замечено, существенно превышает проводимость при жидкостной смазке. Последней из указанных составляющих при определении средней проводимости зоны трения в таком случае можно в первом приближении пренебречь. Тогда выражение (3) примет вид:

$$\bar{G}_{b.mix} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t_{ij}}^{t_{kj}} G_b(t) dt}{\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{ij})}. \quad (4)$$

Анализ последнего выражения показывает, что проводимость определяется во время микроконтактирования рабочих поверхностей и не учитывает паузы между действием импульсов, характерных для граничной смазки.

Изменение проводимости трибосопряжения в процессе работы происходит случайным образом и представляет собой непрерывную функцию, на которой выделяются импульсы проводимости, ограниченные с одной стороны самой функцией, а с другой – интервалами, в течение которых проводимость зоны трения превышает пороговый уровень $G_{b.min}$.

В таком случае диагностический параметр можно представить как характеристику указанных импульсов, соответствующих режиму граничной или смешанной смазки

$$\bar{G}_{b.mix} = \sum_{j=1}^n \int_{t_{ij}}^{t_{kj}} G_b(t) dt. \quad (5)$$

Такой подход предопределяет получение диагностического параметра, имеющего размерность, что является существенным недостатком. Кроме того, параметр относится к параметрам интенсивности, поэтому ему сопутствуют все их недостатки [1].

Общепринятым методом получения безразмерных параметров является нормирование размерной величины по выбранному значению. В данном случае в качестве такого значения удобно выбрать уровень $G_{b.min}$, тем более, что он характеризует переход одного режима смазки в другой. Существенными достоинствами такого подхода являются, например, получение определенной области изменения параметра и упрощение сопоставления его значения с состоянием объекта диагностирования, а также сравнение качества функционирования различных объектов по выбранному параметру.

Выражение (5) также не учитывает интервалы времени, когда осуществляется режим жидкостной смазки – время пауз. Кроме того, время измерения параметров не входит в указанные формулы, что практически исключает возможность объективного сравнения технического состояния даже одного и того же трибосопряжения по данному параметру в различные моменты времени. Это объясняется, прежде всего, тем, что при различном времени измерения будут получены различные значения диагностического параметра.

Так как диагностический параметр обычно измеряется на конечном времени, то в данном случае его можно представить выражением, определяющим чередование импульсов проводимости и пауз между ними:

$$T = \sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{ij}) + \sum_{j=1}^{n-1} (t_{ij+1} - t_{kj}), \quad (6)$$

где $\sum_{j=1}^{n-1} (t_{ij+1} - t_{kj})$ – общая длительность пауз между импульсами.

Максимально возможное значение суммарной проводимости за время измерения T параметра можно определить в виде:

$$G_{max} = G_{b.max} \cdot T. \quad (7)$$

Тогда искомым нормированный диагностический параметр определим выражением:

$$k_s = G_{b,mix} / G_{b,max} ,$$

которое с учетом выражений (5) и (7) представим в следующем виде:

$$k_s = \sum_{j=1}^n \int_{t_{nj}}^{t_{kj}} G_b(t) dt / G_{b,max} \cdot T .$$

Преобразуем последнее выражение к следующему виду:

$$k_s = \frac{\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{nj})}{T} \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{nj}) \right]^{-1} \cdot \sum_{j=1}^n \int_{t_{nj}}^{t_{kj}} G_b(t) dt}{G_{b,max}} , \quad (8)$$

где $\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{nj}) / T = k_\gamma$ – относительное интегральное время, в течение которого наблюдается режим граничной или смешанной смазки;

$\left[\sum_{j=1}^n (t_{kj} - t_{nj}) \right]^{-1} \cdot \sum_{j=1}^n \int_{t_{nj}}^{t_{kj}} G_b(t) dt / G_{b,max} = \gamma_k$ – относительная интегральная проводимость, характеризующая режим граничной или смешанной смазки.

Вводя обозначения, представим выражение (8) в более компактном виде:

$$k_s = k_\gamma \cdot \gamma_k .$$

Анализируя выражение (8), можно сделать следующие выводы.

1. Разработанный диагностический параметр является интегральным и характеризует относительную квазифактическую площадь взаимодействия рабочих поверхностей трибосопряжения при функционировании в режиме граничной или смешанной смазки.
2. Параметр является комплексным, а квазифактическая площадь контакта характеризуется двумя единичными диагностическими параметрами k_γ и γ_k .
3. Разработанный параметр и его единичные составляющие являются относительными, безразмерными и имеют постоянную область определения от 0 до 1.
4. Контакт по максимально возможной площади рабочих поверхностей соответствует значению $k_s = 1$, а при его отсутствии $k_s = 0$.
5. Практическое измерение параметра базируется на основе использования электропараметрических методов диагностирования трибосопряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение - 1, 2001. – 376 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
3. Трение, изнашивание и смазка [Текст]: справочник / И.В. Крагельский, В.В. Алисин и др.; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – В 2-х кн.; кн. 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
4. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: ИЛ, 1961. – 455 с.
5. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов [Текст] / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.
6. Справочник по триботехнике. Теоретические основы [Текст] / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – В 3 т. Т1. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

Захаров Михаил Георгиевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
 Тел.(4862)41-98-76
 E-mail: pms35@ostu.ru

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Е.В. ПАХОЛКИН, С.А. МОРЯКИН, Д.А. КУЗЬМИЧЕВ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Работа содержит теоретическое обоснование возможности обнаружения продуктов деструкции в моторных маслах диэлькометрическим методом. В качестве информативного параметра рассматриваются потери (мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости). Приведены результаты экспериментов, подтверждающие достоверность теоретических исследований.

The research contents theoretical justification of motor oil degradation fragment detection by dielcometric method capacity. There is considered dielectric loss (imaginary part of the complex dielectric permeability) as informative parameter. Outcomes of experiments, that confirms the theoretical researches validity are produced.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Группу химических свойств моторных масел (ММ) составляют следующие показатели и характеристики: химический состав масла, общее щелочное число (ТВН), общее кислотное число (ТАН), число нейтрализации, число сильных кислот (SAN), содержание серы, коксуемость, сульфатная зольность, летучесть, испаряемость [1]. При этом отдельные показатели и характеристики являются нормируемыми.

Недостатком диагностирования ММ с использованием большинства из приведенных признаков является то, что они интегрально оценивают состояние масла. Проведение же полного химического анализа состава ММ представляется задачей, практически не имеющей решения. В любом случае, этот подход неприемлем для разработки диагностического обеспечения ММ и технологий непрерывного мониторинга их качества в процессе эксплуатации по причине технической сложности и экономическим аспектам.

Решением проблемы может являться разработка метода, который удовлетворял бы следующим требованиям:

- сравнительно низкая стоимость технических средств и методического обеспечения;
- минимальные затраты на проведение анализа пробы ММ;
- в основе принятия решения о качестве масла (о моменте его замены) должны быть идентификация компонентов деструкции в масле или установление подобия пробы масла образцу, в качестве которого может служить образец отработанного ММ, подлежащего замене;
- критерии подобия пробы масла образцу с наличием недопустимого количества продуктов деструкции должны быть научно обоснованы.

Диэлькометрический метод контроля состояния моторного масла обладает указанными преимуществами. Однако измерение диэлектрической проницаемости или тангенса угла потерь на одной частоте не позволяет в полной мере решить поставленные задачи по разработке метода диагностирования, так как увеличение диэлектрической проницаемости может быть вызвано различными причинами (не только деструкцией).

В работе [2] показана возможность совершенствования диэлькометрического метода контроля с целью улучшения его функциональных возможностей и повышения достоверности при диагностировании ММ. При этом отмечено, что переход от анализа предельной низкочастотной диэлектрической проницаемости ϵ к частотным характеристикам (дисперсия диэлектрической проницаемости и потери) может существенно повысить информативность диагностирования.

Предлагается, таким образом, перейти к рассмотрению комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'',$$

где ε' – диэлектрическая проницаемость вещества;

ε'' – диэлектрические потери.

Частота $f_{пр} = 1/(2\pi\tau)$, на которой наблюдается максимум диэлектрических потерь ε'' , называется предельной частотой и зависит от времени релаксации τ . По имеющимся справочным данным, различные вещества характеризуются своими индивидуальными значениями параметров τ и $f_{пр}$. Следовательно, появление в масле новых компонентов, для которых числовые значения рассмотренных параметров существенно отличаются от значений для базовых компонентов масел, приводит к изменению характера дисперсии диэлектрической проницаемости и потерь. Таким образом, параметры τ и $f_{пр}$ могут быть эффективно использованы как диагностические, то есть по изменению характера спектра потерь можно судить о степени деструкции ММ. Очевидно, что принятие решений по результатам такой диагностики требует априорной информации о диапазоне частот, в котором необходимо проводить исследования потерь. Обоснованию данного диапазона частот посвящена настоящая работа.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

На рисунке 1 представлены результаты предварительных экспериментальных исследований. В качестве оборудования была использована оригинальная измерительная ячейка с малым значением собственной паразитной индуктивности, которая подключалась к измерителю добротности E4-11 (реализует резонансный метод измерения электрической емкости). Измерения проводились при температуре 20...22 °С. При этом исследовались две пробы масел: одна – новое масло, другая – отработанное масло (BP VISCO 3000, SAE 10W40, пробег автомобиля на момент забора пробы масла составил более 5 тыс. км).

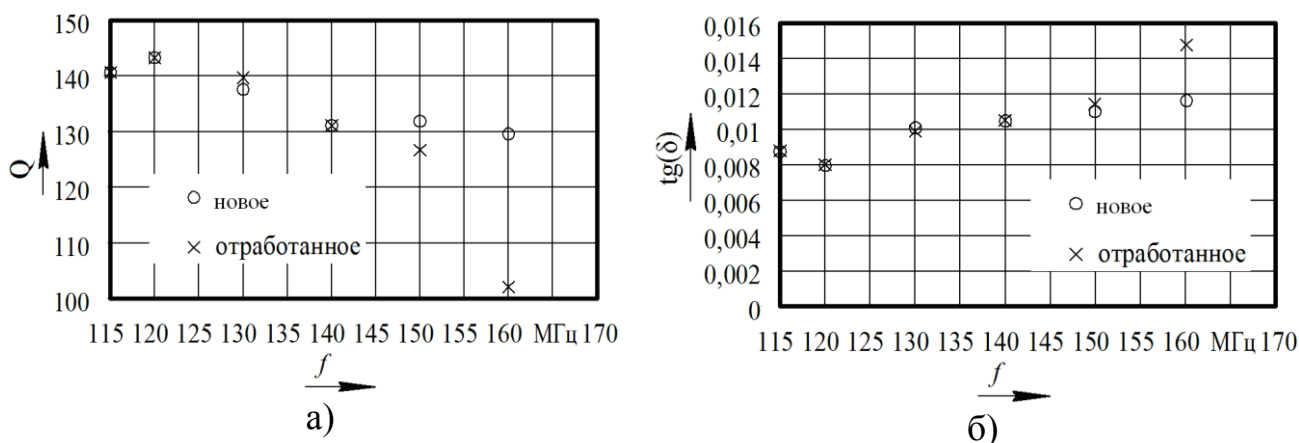


Рисунок 1 – Зависимость параметров от частоты: а – добротности; б – тангенса угла потерь

Результаты исследования добротности Q и тангенса угла потерь $\text{tg}(\delta)$ ячейки с маслом (рисунок 1) позволяют сделать заключение, что на частоте примерно $1,5 \cdot 10^8$ Гц наблюдается различие в характере изменения рассматриваемых параметров для нового и отработанного масла. При этом имелась априорная информация, полученная на основе химического анализа пробы отработанного масла, что в нем присутствовали продукты деструкции, а также ароматические углеводороды.

На основании рассмотренного предварительного эксперимента предлагается аналитическим путем установить вид зависимости диэлектрических потерь от частоты при наличии в смеси веществ, отличающихся по информативному параметру τ от базовой основы масел. Для решения поставленной задачи вначале рассмотрим гипотезу, заключающуюся в

том, что молекулы вещества, окруженные средой из других веществ, имеют время релаксации, отличное от времени релаксации для чистого вещества.

Формула Дебая, связывающая время τ релаксации с характеристиками веществ, имеет вид:

$$\tau(T) = \frac{4\pi \cdot a^3 \cdot \mu(T)}{K \cdot T}, \quad (1)$$

где a – радиус молекулы вещества;

$\mu(T)$ – зависимость макроскопической вязкости от абсолютной температуры T ;

K – постоянная Больцмана.

Согласно выдвинутой гипотезе в (1), следует подставлять в качестве $\mu(T)$ вязкость среды, в данном случае – моторного масла. Экспериментальные данные зависимости вязкости моторного масла от температуры могут быть аппроксимированы уравнением вида:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{-k \cdot T}, \quad (2)$$

где μ_0 – динамическая вязкость при $T = 0$;

k – коэффициент крутизны.

Динамическая вязкость определяется выражением:

$$\mu(T) = \nu(T) \cdot \rho, \quad (3)$$

где $\nu(T)$ – зависимость кинематической вязкости от температуры;

ρ – плотность моторного масла ($\rho = 860 \text{ кг/м}^3$).

Аппроксимировав $\mu(T)$, получим для моторного масла, например, 10W-40 следующие значения: $\mu_0 = 0,437 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $k = 0,034$.

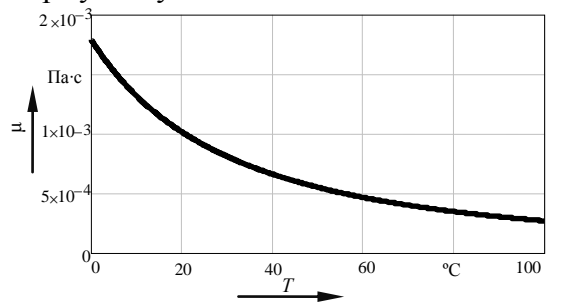
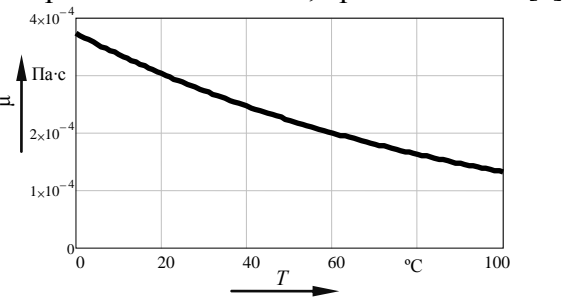
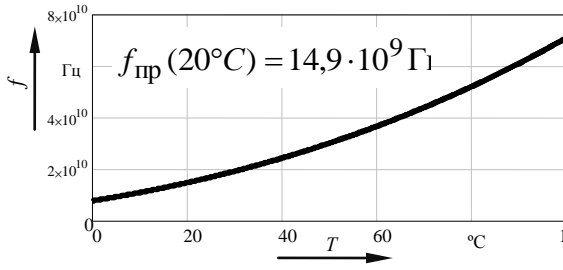
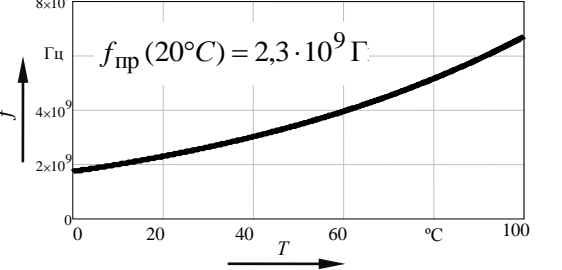
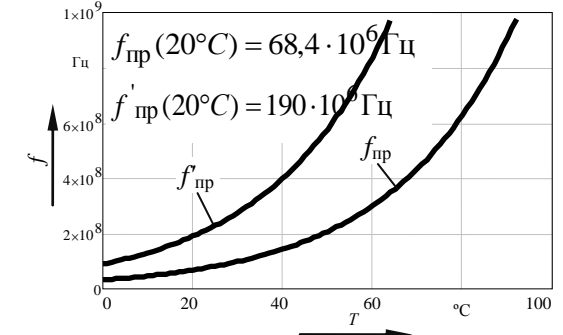
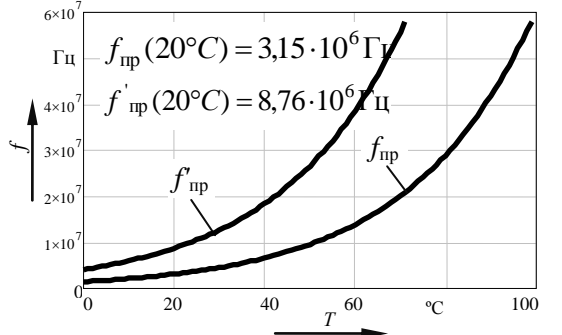
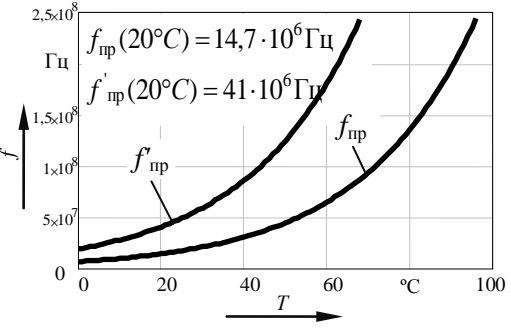
Далее для оценки предельной частоты $f_{\text{пр}}$ веществ в среде моторного масла необходимо определить радиус молекулы. Для приближенного расчета размеров молекул можно применить орбитальные радиусы (теоретически рассчитанное положение – расстояние от ядра главного максимума зарядовой плотности его наружных электронов), хорошо описывающие эффективные размеры изолированного атома. Зависимость орбитального радиуса от порядкового номера элемента показана, например, в статье [4]. Оценим радиус молекулы серной кислоты на основе имеющихся данных: длины связей в молекуле S=O равны 0,143 нм, в молекуле S—OH – 0,154 нм. Угол HO-S-OH составляет 104° , угол O-S-O – 119° . Орбитальные радиусы кислорода и водорода соответственно составляют: $a_H = 0,05 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $a_O = 0,04 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Полученный геометрическим построением оценочный радиус молекулы H_2SO_4 составляет $a_{\text{H}_2\text{SO}_4} \approx 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Аналогично можно оценить радиусы молекул других веществ в составе моторного масла. Для гексана и гексановой кислоты: $a_{\text{C}_6\text{H}_{16}} \approx 0,42 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $a_{\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}} \approx 0,49 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В таблице 1 приведены графики температурных зависимостей предельной частоты воды, гексана и серной кислоты в среде моторного масла. Графики $f_{\text{пр}}$ получены по формуле (2), а скорректированные значения $f'_{\text{пр}}$ получены для предположения, что лучшее согласование с экспериментальными данными дает подстановка в (1) $0,36 \cdot \mu(T)$ вместо $\mu(T)$ [5].

Известно [1], что наиболее важным является обнаружение кислот в моторном масле. В случае подстановки в формулу (1) $0,36 \cdot \mu(T)$ вместо $\mu(T)$ предельная частота для серной кислоты при 20°C составит $f'_{\text{прH}_2\text{SO}_4} = 41 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, при 0°C $f'_{\text{прH}_2\text{SO}_4} = 19,4 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, то есть максимумы диэлектрических потерь из-за наличия серной кислоты могут быть обнаружены уже в области высоких частот, что принципиально важно в аспекте возможности практической реализации метода с использованием серийно выпускаемых средств.

Таблица 1 – Температурные зависимости предельной частоты воды, гексана и серной кислоты в среде моторного масла

Характеристики		Вещество		
		Вода H ₂ O	Гексан H ₆ H ₁₄	Серная кислота H ₂ SO ₄
Параметры веществ	Радиус молекулы a , м	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,42 \cdot 10^{-9}$	$0,25 \cdot 10^{-9}$
	Зависимость динамической вязкости от температуры	<p>Формула Пуазейля</p> 	<p>Аппроксимация данных, приведенных в [6]</p> 	Нет данных
Предельная частота	В однородной среде			$f_{пр}(20^{\circ}C) = 338,6 \cdot 10^6 \text{ Гц [5]}$
	В среде моторного масла			

Для гексановой кислоты получены следующие значения предельных частот: при 20 °С $f'_{\text{пр}} = 5,45 \cdot 10^6$ Гц; при 0 °С $f'_{\text{пр}} = 1,96 \cdot 10^6$ Гц.

Таким образом, максимумы или характерные перегибы характеристики $\varepsilon''(f)$ моторного масла, обусловленные наличием кислот, могут быть обнаружены в диапазоне до 300 МГц, что создает предпосылки для практического применения диэлькометрического метода при диагностике масел с использованием серийно выпускаемых средств измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моторные масла [Текст] / Р. Балтенас, А.С.Сафронов, А.И.Ушаков, В.Шергалес. – Москва-Спб.: Альфа-Лаб, 2000. -272 с.
2. Пахолкин, Е.В. Комплекс средств для исследования диэлектрической проницаемости моторных [Текст] / Е.В. Пахолкин, Д.А. Кузьмичев, Р.В. Анашкин // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2007, №3. – С. 107-110.
3. Классификации и спецификации моторных масел [Электронный ресурс] // Морской портал. – 2007 г. - 16 июля 2007 г. – Режим доступа: www.netharbour.ru/teoriya/gsm/klassifikatsii-i-spetsifikatsii.html.
4. Периодический закон [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия – Загл. с экрана. – Режим доступа: ru.wikipedia.org/wiki/Периодический_закон.
5. Ахадов, Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов [Текст]: справочник /Я.Ю. Ахадов. – М.: Наука, 1977.
6. Сахатова, Г.С. Исследование вязкости двойных систем-парафинов с четным и нечетным числами углеродных атомов в молекуле [Электронный ресурс] // Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева – Загл. с экрана – Режим доступа: www.ntu.kz/index.php?lang=ru&id=410

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Морякин Сергей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Студент
Тел. (4862) 419876
E-mail: MoryakinS@mail.ru

Кузьмичев Денис Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Н.Н. ФОКИН

НОРМИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

В работе изложен метод совместной обработки результатов нескольких трибологических экспериментов при использовании НИВ в качестве информативного параметра. Показано, что при соблюдении постоянства основных факторов, влияющих на толщину смазочного слоя в зоне трения, полученные результаты измерения НИВ могут быть приведены к единому уровню. Такая возможность создает предпосылки для увеличения объема статистических данных, получаемых в ходе экспериментов, а также позволяет проводить сравнение качества исследуемого масла с базовым вариантом.

In work the method of joint processing of results of several tribological experiments is stated at use of NIV as informative parameter. It is shown, that at observance of a constancy of the major factors influencing thickness of a lubricant layer in a zone of friction, the received results of measurement of NIV can be led to a uniform level. Such opportunity creates preconditions for increase in volume of the statistical data received during experiments, and also allows to spend comparison

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [1-3] показано, что применение теории электрорезистивных методов трибодиагностики позволяет решать проблему оценки вязкостно-температурных свойств смазочных материалов. При этом суть метода заключается в следующем.

Проба материала помещается в трибосопряжение, в качестве которого можно использовать подшипник качения; после приработки рабочих поверхностей производится искусственный нагрев трибосопряжения с исследуемой пробой; определяется приращение диагностического параметра как следствие теплового воздействия; перечисленные действия выполняются с эталонной пробой масла, индекс вязкости которого известен; по результатам сравнения приращений диагностического параметра для двух проб делается вывод о пригодности испытуемого масла к дальнейшей эксплуатации.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований эффективности и возможностей разрабатываемого метода оценки вязкостно-температурных свойств моторных масел были выявлены следующие проблемы, без решения которых метод неприменим на практике:

– существующие математические модели не учитывают всей совокупности факторов, определяющих толщину смазочного слоя в подшипнике, а, следовательно, и значение диагностического параметра НИВ;

– даже при использовании в качестве испытательного трибосопряжения одного и того же подшипника при исследовании каждой новой пробы одного и того же масла значения приращений параметра НИВ, вызванные нагревом исследуемой пробы, являются каждый раз различными. При этом какое-либо усреднение результатов не дает эффекта.

Таким образом, возникает задача разработки метода нормирования результатов измерения диагностического параметра с учетом того, что эксперименты могут проводиться в различное время, с различными экземплярами подшипников. Решение данной задачи описывается в настоящей работе.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 1 показаны два примера характера изменения диагностического параметра НИВ в процессе обкатки подшипника с пробой жидкого смазочного материала и его последующего нагрева. В совокупности рисунок иллюстрирует 4 эксперимента. В качестве проб масла использовалось чистое минеральное масло без присадок, на рисунке 1 и последующих названное базовым (базовая основа), а также смазочная композиция,

составленная базовой основой и вязкостной присадкой, улучшающей вязкостно-температурные свойства.

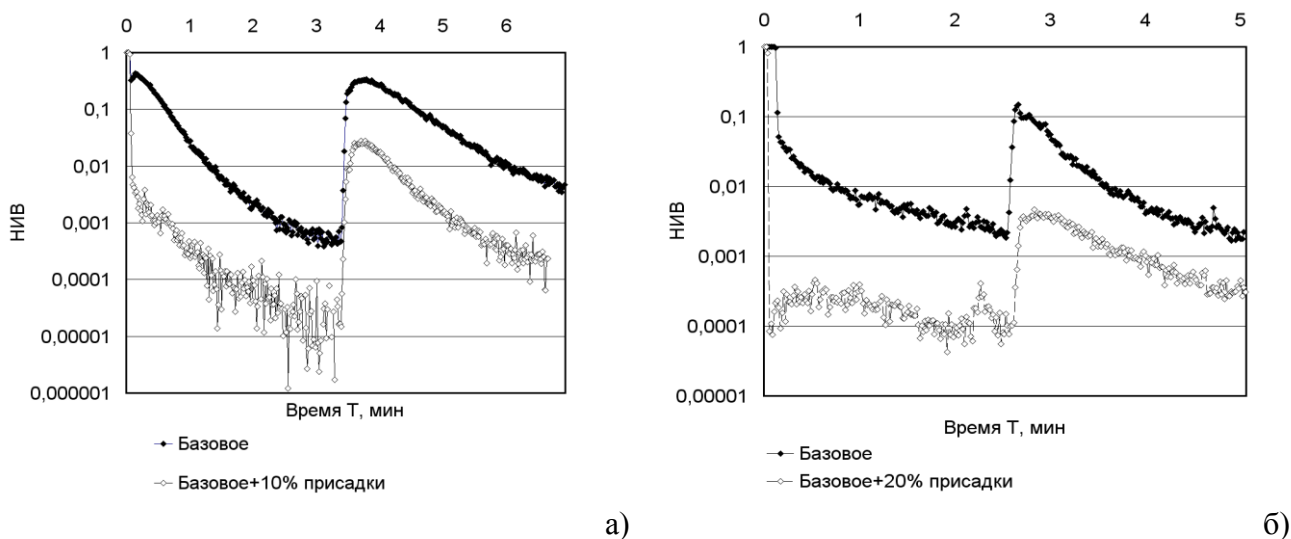


Рисунок 1 – Пример изменения НИВ для проб масла с различным индексом вязкости: а – базовое минеральное масло и масло с добавлением 10 % вязкостной присадки; б – базовое минеральное масло и масло с добавлением 20 % вязкостной присадки

В соответствии с изложенным выше методом пробы масла заливались в подшипник, который использовался в качестве испытательного трибосопряжения. В течение нескольких минут (на рисунке 1а – 3,5 мин., на рисунке 1б – 2,5 мин.) производилась обкатка подшипника, целью которой является приработка рабочих поверхностей и стабилизация уровня диагностического параметра. Процесс формирования микрорельефа при этом сопровождается уменьшением уровня НИВ с получением на временной диаграмме горизонтального или почти горизонтального участка.

После стабилизации уровня НИВ производился искусственный нагрев подшипника с пробой, избыточная температура составляла 70 °С. При этом наблюдалось теоретически обоснованное [3] резкое возрастание диагностического параметра.

Формальный анализ рисунка 1а позволяет констатировать следующее.

При нагреве пробы базового масла с заведомо худшими вязкостно-температурными свойствами произошло увеличение параметра НИВ почти на три порядка. При этом аналогичный эксперимент со смазочной композицией, обладающей более высоким индексом вязкости, привел к увеличению диагностического параметра более, чем на три порядка.

Результаты, приведенные на рисунке 1б, характеризуются примерно одинаковым уровнем роста параметра НИВ, как для базового масла, так и для смазочной композиции, обладающей большим индексом вязкости.

Очевидно, что представленные результаты противоречат разработанным теоретическим положениям метода контроля вязкостно-температурных характеристик [2, 3] и, на первый взгляд, ставят под сомнение его эффективность и работоспособность.

Объяснением полученного противоречия может служить гипотеза, заключающаяся в том, что значение приращения диагностического параметра определяется не только свойствами масла, но и начальным уровнем НИВ на момент теплового воздействия. Данная гипотеза была выдвинута Е.В. Пахолкиным (ОрелГТУ) на основе анализа результатов серии экспериментов, проведенных по рассмотренной методике. Таким образом, экспериментальное подтверждение достоверности гипотезы получено. Ниже приводится теоретическое обоснование рассмотренного эффекта, а также предлагается метод нормирования результатов измерения параметра НИВ с целью возможности сравнения результатов различных экспериментов.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Математическая модель, описывающая вероятность P микроконтактирования трущихся поверхностей, может быть представлена совокупностью представленных ниже выражений.

$$P = 0,5 - \Phi \left(\frac{h}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}} \right) = 0,5 - \Phi(\lambda), \quad (1)$$

где h – толщина смазочного слоя;

Ra_1 и Ra_2 – параметры шероховатости рабочих поверхностей первой и второй детали;

λ – критерий, определяющий вид смазки;

Φ – интегральная функция нормированного нормального распределения.

Значение толщины h смазочного слоя в выражении (1) для эллиптического контакта при эластогидродинамической смазке может быть определено из выражения [4]

$$h = r_x \cdot \left(1,82 - 0,68 \cdot \frac{r_x}{r_y} \right) \cdot \left(\frac{\eta \cdot \alpha \cdot u}{r_x} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{P_{max}}{E_{пр}} \right)^{-0,52}, \quad (2)$$

где r_x , r_y – приведенные радиусы кривизны контактирующих поверхностей в направлении качения и ему перпендикулярном;

η – динамическая вязкость;

α – пьезокоэффициент вязкости;

u – скорость относительного перемещения поверхностей;

P_{max} – максимальное давление в контакте по Герцу;

$E_{пр}$ – приведенный модуль упругости.

Принимая во внимание, что предметом исследования является изменение вероятности микроконтактирования при тепловом воздействии, в качестве вязкости η в выражении (2) следует рассматривать функциональную зависимость от температуры [4]:

$$\eta(p, \Theta) = \eta_0 \cdot \exp(\alpha \cdot p - \delta \cdot (\Theta - \Theta_0)), \quad (3)$$

где Θ – температура смазочного слоя;

η_0 – динамическая вязкость при атмосферном давлении и температуре Θ_0 , при которой измерялась вязкость;

δ – коэффициент.

Необходимо отметить, что представленная модель (1)–(3) является упрощенной, так как рассматривает вероятность контактирования всего лишь пары микронеровностей, однако такое упрощение никак не влияет на дальнейшие рассуждения и выводы.

Объяснением отсутствия воспроизводимости от эксперимента к эксперименту уровня диагностического параметра НИВ в процессе предварительной обкатки подшипника при использовании модели (1)–(3) могут служить два фактора.

Во-первых, процесс формирования микрорельефа рабочих поверхностей подшипника после каждой его промывки, смазывания и установки на стенд протекает по-разному. На диаграммах рисунка 1 стабилизация уровня параметра НИВ наступает за короткое время, но этот процесс нельзя отождествлять с завершением приработки рабочих поверхностей – процессом, который требует значительно большего времени. В связи с этим, параметры Ra_1 и Ra_2 в формуле (1) позволяют лишь оценить расчетным методом λ -параметр, и вся совокупность явлений, с которыми связано формирование пятна контакта (фактической площади контакта) моделью не раскрывается.

Во-вторых, параметры выражения (2), принятые за константы, в реальных экспериментах воспроизводятся с погрешностями. Прежде всего, следует учитывать невоспроизводимость скорости u относительного перемещения деталей подшипника. В выражении (2) предполагается определение данного параметра, исходя из зависимостей,

описывающих кинематику подшипника. При постоянной частоте вращения вала в различных экспериментах формально должно выполняться $u = \text{const}$. Однако известно, что наряду с трением качения в подшипнике наблюдается проскальзывание, и данная составляющая не учитывается в выражении (2), а в реальном эксперименте, видимо, не всегда воспроизводится. Подтверждением данной гипотезы могут служить результаты, описанные в статье [5], где приводится описание исследований приработки подшипника при одних и тех же режимах, но с разным количеством смазочного материала. В данной работе показано, что превышение оптимального объема масла, добавляемого в подшипник, приводит к росту интенсивности микроконтактирования. При этом авторы связывают данный эффект с увеличением составляющей трения скольжения в результате дестабилизации характера движения шариков при повышенном количестве смазочного материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что в серии экспериментов практически невозможно получить единый уровень диагностического параметра на момент его стабилизации, так как параметры модели, принимаемые как управляемые и детерминированные факторы, таковыми являются лишь условно.

Требуется доказать, что независимо от начального уровня параметра НИВ на момент теплового воздействия уменьшение λ -параметра определяется значением избыточной температуры и является воспроизводимым от эксперимента к эксперименту.

Рассмотрим на основании модели (1)–(3) последовательность процессов, происходящих при нагревании испытательного трибосопряжения.

Пусть параметры $r_x, r_y, u, P_{max}, E_{пр}, Ra_1, Ra_2$ к моменту теплового воздействия являются константами (отдельные определяются характеристиками и параметрами подшипника, другие – заданными скоростным и нагрузочным режимами). Для данных условий формируется некоторое значение h_1 толщины смазочного слоя и, соответственно, некоторое значение λ_1 критерия вида смазки. Исходя из (1), на момент окончания приработки формируется вероятность P_1 контактирования.

При увеличении температуры в соответствии с выражением (3) происходит уменьшение вязкости масла в подшипнике от η_1 до η_2 , приводящее к уменьшению толщины смазочного слоя от h_1 до h_2 , исходя из пропорциональности $h \approx (\eta)^{0,75}$. Наконец, в соответствии с (1) с уменьшением значения λ -параметра от λ_1 до λ_2 увеличивается вероятность микроконтактирования трущихся поверхностей от P_1 до P_2 .

Важнейшим принципиальным моментом в данной цепи рассуждений является то, что при обеспечении постоянства начальной Θ_1 и конечной Θ_2 температур соблюдаются пропорциональности $\eta_1 = k_1 \cdot \eta_2, h_1 \approx (k_1 \cdot \eta_2)^{0,75} = k_2 \cdot \eta_2$. Таким образом, можно принять, что результатом теплового воздействия $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ является детерминированное уменьшение λ -параметра:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{k_3}, \tag{4}$$

где k_3 – константа, зависящая только от $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ при соблюдении постоянства условий эксперимента.

Очевидно, что приведенные рассуждения также справедливы для любого другого фактора, определяющего толщину смазочного слоя. При этом на основании полученного утверждения (4) можно предложить следующий метод нормирования результатов эксперимента.

Пусть в результате предварительной приработки и последующего нагрева получены некоторые значения параметра НИВ, оценивающие вероятности контактирования P_n и P_k , соответственно, P_n – на момент начала теплового воздействия, а P_k – пиковое значение, являющееся следствием уменьшения вязкости. При исследовании проб базового и диагностируемого масла, таким образом, имеются две пары значений: $P_{нб}, P_{кб}$ – для базового и $P_{нд}, P_{кд}$ – для диагностируемого.

Для адекватного сравнения приращений параметра НИВ необходимо нормировать результаты таким образом, чтобы на момент начала теплового воздействия $P_{нд} = P_{нб}$. Для этого на основании теоретической зависимости (1) устанавливаются значения λ -параметра $\lambda_{нб}$, $\lambda_{кб}$, $\lambda_{нд}$ и $\lambda_{кд}$, соответствующие вероятностям $P_{нб}$, $P_{кб}$, $P_{нд}$ и $P_{кд}$.

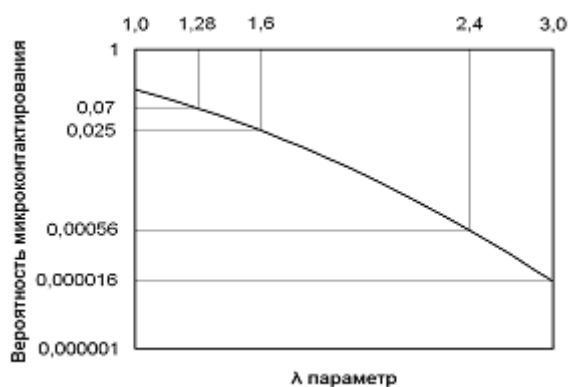
В соответствии с (4) определяется k_3 :

$$k_3 = \frac{\lambda_{нд}}{\lambda_{нб}}. \quad (5)$$

При этом предполагается, что $\lambda_{нд} > \lambda_{нб}$.

Далее с помощью найденного значения k_3 выполняется приведение $\lambda_{нд}$ к $\lambda_{нб}$, а $\lambda_{кд}$ – к некоторому нормированному значению $\lambda'_{кд}$.

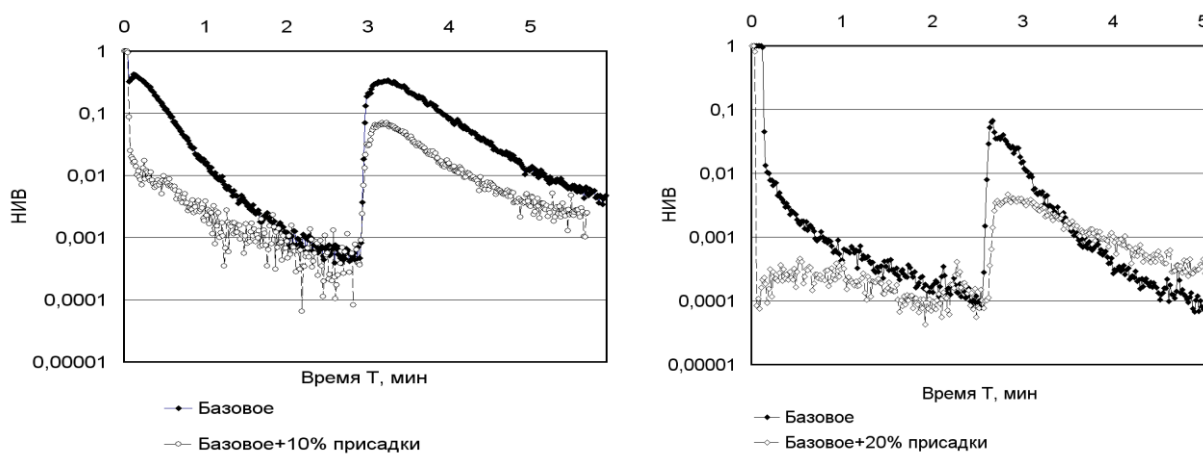
Описанный алгоритм поясняется рисунком 2, где показано нормирование результатов диагностирования пробы масла с 10%-м содержанием вязкостной присадки, ранее представленных на рисунке 1а.



$$\begin{aligned} \lambda_{нд} &= 3; P_{нд} = 1,6 \cdot 10^{-5}, \\ \lambda_{нб} &= 2,4; \\ P_{нб} &= 5,6 \cdot 10^{-4} \\ \lambda_{кд} &= 1,6; \\ P_{кд} &= 2,5 \cdot 10^{-2} \\ \lambda'_{кд} &= 1,28; \\ P'_{кд} &= 7 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Рисунок 2 – Иллюстрация алгоритма нормирования результатов измерения параметра НИВ

На рисунке 3 показаны результаты, описанные рисунком 1 с учетом нормирования. При этом в качестве нормируемого уровня параметра НИВ принимались средние значения параметра, полученные для базового масла на момент начала теплового воздействия.



а)

б)

Рисунок 3 – Нормирование результатов, показанных на рисунке 1: а – базовое минеральное масло и масло с добавлением 10 % вязкостной присадки; б – базовое минеральное масло и масло с добавлением 20 % вязкостной присадки

ВЫВОДЫ

1. Анализ диаграмм, представленных на рисунке 3, позволяет сделать вывод, что приращения диагностического параметра НИВ, вызванные нагревом проб базового масла, на порядок и более превышают соответствующие приращения НИВ, полученные для смазочных композиций с вязкостной присадкой.

2. Выполнение алгоритма нормирования результатов измерения диагностического параметра позволяет адекватно сравнивать результаты, имеющие различные начальные уровни параметра перед тепловым воздействием.

3. О пригодности диагностируемого масла к дальнейшему применению можно судить по различию значений приращений НИВ для диагностируемого и базового (эталонного) масел. При этом должно выполняться условие $P_{кб} > P'_{кд}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахолкин, Е.В. Исследование возможности контроля показателей качества смазочных материалов электрическим методом [Текст] Е.В. Пахолкин // Контроль. Диагностика.– 2004. – № 9.

2. Пахолкин, Е.В. Обоснование критерия интерпретации результатов измерения диагностического параметра НИВ при исследовании вязкостно-температурных характеристик моторных масел [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2007, №2. – С. 130-134.

3. Пахолкин, Е.В. Совместное использование диагностического параметра НИВ и индекса вязкости при контроле качества всесезонных моторных масел [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. науч. тр./ Под ред. В.Н. Латышева. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2007. Вып. 6. – С. 50-54.

4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

5. Пахолкин, Е.В. Разработка на основе электрических методов трибомониторинга диагностического обеспечения узлов трения с ресурсным режимом смазывания [Текст] / Е.В. Пахолкин, А.М. Сидоров // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2007, №4-3/268(535). – С. 65-70.

Фокин Николай Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 419876

E-mail: alphabet2004@mail.ru

Адрес редакции:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор Г.А. Константинова
Корректор Г.А. Константинова
Компьютерная верстка А.В. Рябова

Сдано в набор 15.08.2008 г.
Подписано в печать 12.09.2008 г.
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,6.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.