

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель.

Голенков В. А. д.т.н., проф.

Зам. председателя:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Светкин В. В. к.т.н. доц.

Колчунов В. И. д.т.н., проф.

Гордон В. А. д.т.н., проф.

Константинов И. С. д.т.н., проф.

Садков В. Г. д.э.н., проф.

Кулаков А. Ф. к.т.н. доц.

Фролова Н. А. к.социол.н., доц.

Соков О. А. к.т.н., доц.

Борзенков М. И. к.т.н. доц.

Поланцова Л. И.

Одолева М. В.

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Киричек А. В. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Подмастерьев К. В. д.т.н., проф.

Васильев А. С. д.т.н., проф.

Васин С. А. д.т.н., проф.

Дальский А. М. д.т.н., проф.

Зубарев Ю. М. д.т.н., проф.

Суслов А. Г. д.т.н., проф.

Технический редактор:

Марков В. В. к.т.н.

Художественный редактор:

Барсуков Г. В. к.т.н. доц.

Компьютерная верстка:

Яковенко М. В.

АДРЕС РЕДАКЦИИ СЕРИИ

362020 Россия, Орел,

Наугорское шоссе, д. 29

Кафедра ПМиС

Редколлегия журнала

Известия ОрелГТУ.

Серия «Машиностроение.

Приборостроение»

тел: (4862) 41-98-77, 41-98-18

факс: (4862) 41-66-84

E-mail: pms35@mail.ostu.ru

Зарегистрировано в Министерстве

РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств

массовой информации

Свидетельство: ПИ № 77-15496

от 20 мая 2003 г.

Формат 69×90/8

Печать ризографией.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7

Тираж 500 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

• ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

- Мурахтанов Е.С., Горюнова Е.А. Методика отбора проб почв с целью контроля загрязнений сельхозугодий выбросами автотранспорта ..... 2
- Калюк А.В., Корндорф С.Ф., Гаврищук В.И. Термоэлектрический метод прогнозирования свойств биметаллических чувствительных элементов ..... 5
- Косчинская Е.В. Современная технология обнаружения металлических частиц в плоских движущихся материалах ..... 7
- Ногачева Т.И., Корнев М. Н. Исследование корреляционной зависимости анизотропии термоэлектрической чувствительности и модуля упругости углеродистой стали ..... 10
- Корнеев Е.Ф., Верижников С.В. Анализ параметров, определяющих погрешность измерения теплового сопротивления силовых полупроводниковых модулей при постоянной температуре перехода ..... 13
- Коробко В.И., Калашникова Н.Г. Геометрическое моделирование формы пластинок – элемент САПР при контроле качества строительных конструкций ..... 16
- Савельев С.И., Плотицкий С.И. Методика вибросейсмического контроля по амплитудно-временным параметрам ..... 19
- Тарасова М.А., Бухвостова Т.Е. Разработка нового методико-программного комплекса рентгенофлуоресцентного определения элементов на спектрометре СРМ 25 ..... 22
- Иванов Б. Р., Богданов Н.Г., Щекотихин С.Н. Особенности вихревого контроля толщины немагнитных покрытий ..... 25

• ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

- Бондарева Л.А., Жучков А.Н. Средство контроля и диагностики электрофизиологических параметров растений ..... 30
- Егоров Б.А., Яковенко М.В. Проблемы проектирования биоуправляемых аппаратов токовой терапии ..... 32
- Бобров А.В. Модельное изучение возможного механизма действия активированной воды на живые организмы ..... 36

• ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ

- Мишин В.В. Комплект экспериментального оборудования для реализации электрических и совместных методов диагностирования подшипников и подшипниковых узлов ... 39
- Волчков А.Н., Нахалкин Е.В., Сычев С.Н., Гаврилина В.А. Экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости моторных масел в процессе их эксплуатации ..... 43
- Корндорф С.Ф., Чекашова Н.В. Возможность применения шумовой термометрии для определения температуры смазочной пленки ..... 46
- Подмастерьев К.В., Марков В.В., Мишин В.В. Математическое моделирование электрического сопротивления трибообъектов при граничной смазке ..... 48

• ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Косчинский С.Л. Высоковольтный резонансный преобразователь напряжения с частотным управлением ..... 56
- Кузьмин А.С., Кудинов Г.В., Шолоник А.П. Интерактивный алгоритм исследования динамики импульсных преобразователей энергии ..... 58

• ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

- Шалобаев Е.В., Мошахов Ю.С., Старжинский В.Е. Особенности проектирования и технологии изготовления многоступенчатых соосных редукторов приборов для оптимизации их эксплуатационных характеристик ..... 61

• ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

- Киричек А.В., Афонин А.Н. Расчет высоты микронеровностей при статико-импульсной обработке наружных цилиндрических поверхностей охватывающим инструментом ..... 66
- Короткий Г.П. Применение упрочняющей обкатки роликами при производстве тонкостенных осесимметричных деталей ..... 68
- Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Самойлов Н.Н., Фомин Д.С. Способ обработки поверхностным пластическим деформированием пружинным инструментом ..... 71

• ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

- Кулаков А.Ф., Кислов В.О. Управление точностью токарной обработки нежестких валов с непрерывно-поперечной подачей ..... 74

• ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- Пронин В.В. Исследование возможности использования оксидной изоляции в приборной продукции ..... 76

• СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

- Степанова Е. Ю. Многоуровневые структуры: качество, конкурентоспособность, инновации ... 78

## ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

УДК 322.332.223

Д-р с.-х. наук, проф. Мурахтанов Е.С., асп. Горюнова Е.А.  
(Брянская государственная инженерно-технологическая академия)  
г. Брянск, тел. (4832)752457

## МЕТОДИКА ОТБОРА ПРОБ ПОЧВ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ СЕЛЬХОЗУГОДИЙ ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА

*Pollution inspection method of the agricultural grounds by the emissions of motor transport allows to keep their fertility and to raise the quality of the plant-growing production, and the developed technique of taking of soil samples for the chemical analysis allows to get authentic representation about concentration of heavy metals in ground.*

Земельные ресурсы выступают в качестве сложного экологического объекта, требующего оценки отрицательного воздействия отработавших газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания на весь агрокомплекс. Автотранспорт воздействует на сельскохозяйственные почвы через выхлопные газы, поступающие в атмосферу путем последующего осаждения паров, аэрозолей, пыли, сажи или растворенных веществ вместе с дождями, снегом, сухими выделениями. Негативное влияние двигателей внутреннего сгорания ускоряет процесс исключения плодородного слоя земли, что может привести к общему снижению темпов получения естественных продуктов питания. Выбросы автомобилей загрязняют почвы оксидами и диоксидами углерода, оксидами азота, углеводородами, альдегидами, сажей, бензапиреном, тяжелыми металлами через атмосферу непосредственно вдоль дорог, на стоянках и автопредприятиях. На поверхности земли около дорог с высокой интенсивностью движения концентрации тяжелых металлов могут составлять в среднем (части на миллион частей): кадмия – 1,67; меди – 64; марганца – 330; цинка – 164; железа – 10664.

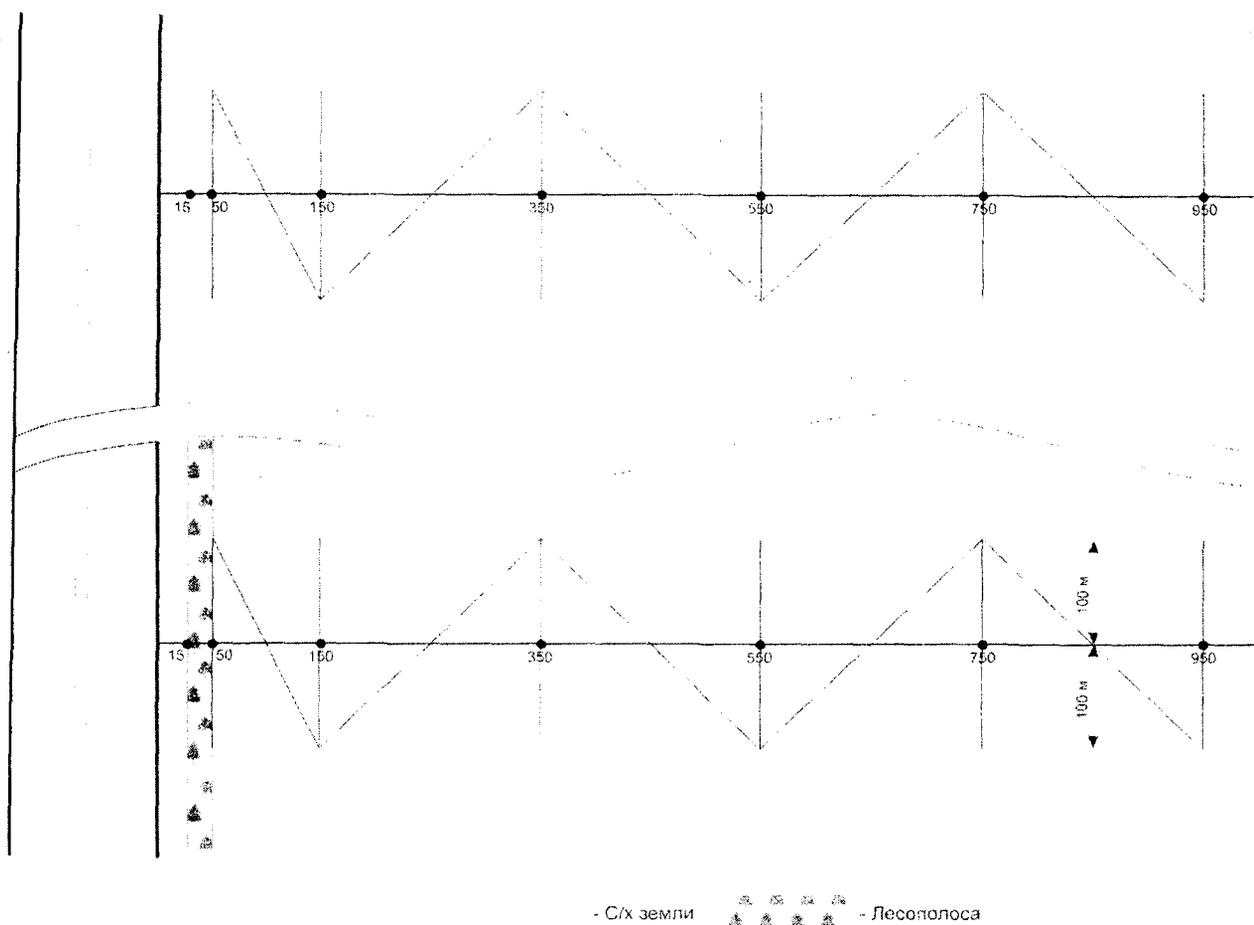
Количество выделяемых в окружающую среду вредных веществ зависит от численности и структуры автомобильного парка, а также от технического состояния автомобилей. Факел выброса от одного легкового автомобиля распространяется на подветренной территории в радиусе 150 – 200 м, а на расстоянии 50 м наблюдается значительное превышение ПДК. На скорость загрязнения и концентрацию его в отдельных зонах влияют температурные инверсии, возникающие при штилевой погоде или слабых ветрах (1 – 4 м/с). Толщина инверсионного слоя может достигать от 300 до 500 м.

Металлы – токсиканты, поступая в почву, вступают в различные химические реакции, адсорбируются органическим веществом, глинистыми минералами, оксидами, причем в разных почвах соотноше-

ние этих форм и поведение тяжелых металлов различны. Унифицированные уровни загрязняющих веществ в почвах не могут быть установлены [1]. Они неизбежно должны сильно варьироваться в зависимости от конкретной экологической ситуации, в том числе и от свойств почвы, климатических условий, вида растительности. На пахотных сельскохозяйственных землях – от вида и сорта культур. Для изучения состояния почв под воздействием вредных выбросов автомобильных двигателей внутреннего сгорания применяют системный (комплексный) подход, подразумевающий исследования почв в неразрывной взаимосвязи и взаимообусловленности с окружающей средой.

При взятии почвенных образцов данные массовых анализов распространяются на определенную площадь, поэтому почвенный образец должен быть типичен для всего пахотного слоя характеризуемой площади. При установлении частоты взятия проб почв для различных территорий необходимо учитывать дальность рассеивания различных выбросов токсичных веществ двигателями внутреннего сгорания, удаленность данного участка от автомобильной магистрали. Для взятия смешанных почвенных образцов используется тростевой бур. Тростевой бур состоит из металлической штанги длиной 50 см и диаметром 1,5-1,7 см; нижняя рабочая часть штанги имеет открытое углубление-желобок глубиной и шириной 10 мм. Выше желобка перпендикулярно к штанге приварен упор длиной 8 см для надавливания ногой при углублении бура в почву. Бур одновременно забирает 15-20 г почвы и поэтому для составления смешанного образца весом 300-400 г придется отбирать не менее 20 индивидуальных проб.

При размещении пунктов взятия проб применяется маршрутный способ. Взятия проб проводят через определенные расстояния вдоль линии, проходящей через весь участок. Если поле равное по рельефу, то маршрутные линии проводят параллельно любой



15...950 - расстояние от автодороги до места взятия проб (м)

Рис. 1. Методика взятия образцов проб почв

стороне поля, предпочтительно по направлению короткой стороны. Разбивку маршрутных линий начинают с отмеривания расстояний между ними вдоль границы (стороны) поля, перпендикулярной к направлению линий. Первый промер от угла поля делают на половину намеченного расстояния, затем отмеривают расстояние от второй линии и так далее до следующего угла. Такие же промеры делают на противоположной стороне поля и в каждой точке ставят вежу. По этим ориентирам прокладывают маршрутные ходы. По маршрутному ходу, начиная с начальной точки (на границе поля), отмеривают расстояния. При длине маршрутной линии 1000 м и числе проб 10 расстояние между точками равно 100 метров. Однако целесообразно делать первую пробу на расстоянии до 100 м, а последующие 4 – через каждые 200 м поля (рис. 1).

Если исследуемый участок имеет лесозащитную полосу, то первая объединенная проба берётся по середине участка, расположенного до лесополосы. При выполнении эксперимента на расстоянии 15 м от края дороги провели вдоль поля полосу в 250 м через каждые 10 м тростевым буром на глубину пахотного слоя (0-20 см) были взяты 25 точечных проб для объединенной первой пробы. Пробу необходимо брать на таком расстоянии, т.к. на этих землях может пас-

тись скот, а выращенная трава идет на корм домашним животным, т.е. эти земли имеют с/х назначение.

При отсутствии лесозащитной полосы первую объединенную пробу берут также на расстоянии 15 м от полотна дороги, а вторую – на расстоянии от 50 до 150 м от края дороги. При наличии лесополосы за точку отчета принимают конец лесополосы и при помощи «сажени» отмеряют расстояние 100 м вглубь поля. Комплексную пробу берут с участка 200x100 м<sup>2</sup>. Она состоит из 25 индивидуальных проб. Третью пробу берут на расстоянии от 150 до 350 м, площадь участка 200x200 м<sup>2</sup>. Три последующие пробы берут через каждые 200 м поля (350-550 м, 550-750 м, 750-950 м) с участка площадью 200x200 м<sup>2</sup>. Объединенные пробы состоят из 25 индивидуальных.

Установлено, что на общее загрязнение примыкающих к автодороге сельхозугодий не влияют микрозоны, поэтому необходимо брать комплексную пробу. Каждая объединенная проба почвы состоит из точечных проб, равномерно отбираемых на элементарном участке по маршрутному ходу. К отбору проб на каждом земельном участке надо подходить индивидуально, так как каждый из них имеет свои размеры, конфигурацию, почвенные контуры и другие особенности. На пахотных почвах точечные пробы отбирают на глубину пахотного слоя из подпахотного

го слоя (две прикопки на элементарный участок). Загрязнение почв зависит от микроциркуляции воздушных масс, поэтому могут быть выявлены загрязненные участки, расположенные далеко от дороги.

Учитывая неоднородность сложения почвенного профиля, в том числе пахотного слоя и почвенного покрова, каждая объединенная почвенная проба на всех типах почв составляет:

- 1) в зоне развития почв дерново-подзолистого ряда – из 20-40 точечных проб;
- 2) в зоне серых лесных почв – из 30 точечных проб;
- 3) во всех остальных зонах – из 20 точечных проб.

Номер объединенной пробы должен соответствовать номеру поля (участка), обозначенного на плане внутрихозяйственного землеустройства с границами земельных участков и контурами почв. В случае обнаружения выраженных понижений на поле с этих участков отбирают отдельную объединенную пробу.

Если ограничиться одной микропробой, получается большая дисперсия результатов измерений. При взятии комплексной пробы с участка площадью 200x200 м<sup>2</sup> дисперсия резко уменьшается. Увеличение дальнейшей площади, даже если не варьируется почва нецелесообразно, так как дисперсия не изменяется. Макрозоны загрязнения обусловлены розой ветров, рельефом местности.

Исследования почв производились на определение тяжелых металлов, содержащихся в выбросах автомобильных двигателей внутреннего сгорания. На основании проведенных в соответствии с выбранной методикой анализов получены следующие результаты (таблицы 1, 2). Наибольшее загрязнение тяжелыми металлами с/х почв наблюдается при удаленности их от автотрассы от 15 до 350 м. В радиусе до 1 км обнаруживается повышенное содержание никеля,

меди, свинца, цинка, кадмия. При удаленности поля до 5 км от автотрассы содержание тяжелых металлов в почвах варьируется в пределах ПДК.

Основным критерием для оценки степени загрязнения почв являются предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентированные допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве, согласно ГОСТ 17.4.1.03-84. Если концентрация загрязняющих веществ находится на уровне или выше ПДК, то такие почвы относятся к категории загрязненных и должны находиться под постоянным контролем внутренних служб контроля. При проведении контроля за загрязнением почв класс опасности химических веществ учитывают по ГОСТ 17.4.1.02-83 [2].

Коэффициент концентрации загрязнения почвы  $H_c$  вычисляют по формуле:

$$H_c = \frac{C}{C_{\text{ПДК}}}, \quad (1)$$

где  $C$  – общее содержание загрязняющих веществ;  
 $C_{\text{ПДК}}$  – содержание предельно-допустимых количеств загрязняющих веществ.

Интегральный показатель поли элементарного загрязнения почвы  $H_{cj}$  вычисляют по формуле:

$$H_{cj} = \sum_j \frac{C_j}{C_{\Phi j}}, \quad (2)$$

где  $C_j$ ,  $C_{\Phi j}$  – соответственно, суммы концентрации и фонового содержания загрязняющих веществ.

Цинк, свинец и ртуть относятся к I классу опасности; медь, никель, хром и кобальт – ко II классу опасности. Для свинца ПДК составляет от 3,0 до 6,0 мг/кг. Наиболее опасная концентрация свинца по экспериментальным данным составляет 9,2 мкг/кг.

Таблица 1 – Автотрасса Орел – Витебск 156 км, поле с лесополосой

Расстояние от дороги, м	Фактическое значение показателей, мг/кг					
	кадмий	свинец	цинк	медь	ртуть	никель
15	0,163	4,2	18,3	7,4	0,01	8,7
50-150	0,151	4,8	18,3	8,0	0,03	8,5
150-350	0,149	4,7	17,8	7,4	0,03	8,3
350-550	0,147	4,6	16,8	7,4	0,03	8,1
550-750	0,141	9,2	15,9	7,2	0,03	7,4
750-950	0,140	4,2	15,8	7,1	0,03	7,1
5000	0,130	3,7	14,3	3,1	0,01	4,9

Таблица 2 – Автотрасса Орел – Витебск 157 км, поле без лесополосы

Расстояние от дороги, м	Фактическое значение показателей, мг/кг					
	кадмий	свинец	цинк	медь	ртуть	никель
15	0,192	5,9	20,3	9,0	0,03	9,5
50-150	0,181	6,1	19,2	8,9	0,04	9,4
150-350	0,169	5,7	18,6	8,7	0,04	9,0
350-550	0,164	5,3	18,6	7,9	0,04	8,7
550-750	0,157	4,6	18,0	7,6	0,03	8,5
750-950	0,145	4,4	17,4	7,3	0,03	8,3
5000	0,140	4,0	15,0	4,3	0,02	5,7

Коэффициент концентрации загрязнения почвы по свинцу  $C_c$  составляет 1,53. Необходим тщательный контроль за этими землями и сельскохозяйственными культурами, произрастающими на данной территории. В ходе эксперимента обнаружено повышенное содержание меди (ПДК = 3,0 мг/кг) и никеля (ПДК = 4,0 мг/кг).

Наличие материнских пород, являющихся биогеохимическим барьером на пути миграции большинства техногенных загрязнителей, может служить местом их аккумуляции в сложившихся почвенно-климатических условиях, увеличить поступление тяжелых металлов в зону корневой деятельности, что

подтверждается проведенными исследованиями для ряда элементов. В конечном итоге все это может привести к загрязнению производимой сельскохозяйственной продукции.

#### Литература:

1 Колесников С.И. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами./Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. – Ростов на Дону: СКНЦ ВШ, 2000. – 232 с.

2 Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (ЦИНАО). – М.: 1989. – 58 с.

УДК 047.31:62-555.621.1

Асп., инж. Калюк А.В., д.т.н., проф. Корндорф С.Ф.  
(Орловский государственный технический университет),  
к.т.н. гл. инж. СКБприбор Гавришук В.И.  
(ЗАО «Орлэкс»), г. Орел, тел. (4862)419566

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Was carried out experiment for determining of thermoelectric coefficient of bimetal, from which aftermath was made sensitive elements for mass produced devices. The results of measurement shows, the availability of thermoelectric method for incising sensitive elements yield.*

Термобиметаллы применяются в основном для изготовления термочувствительных элементов устройств измерения, контроля и регулирования температуры, а также в качестве компенсирующих элементов при температурных воздействиях. Достоинствами чувствительных биметаллических элементов по отношению к другим типам преобразователей являются их простота, надежность, технологичность, компактность и относительно низкая стоимость. Эти преимущества делают термобиметаллы практически незаменимыми в ряде устройств.

Предприятием ЗАО «Орлэкс» выпускается целый ряд датчиков-реле температуры, чувствительным преобразователем которых является биметаллический элемент. Законы рыночной экономики требуют постоянного поиска методов повышения качества продукции, снижения ее себестоимости и улучшения показателей надежности. Очевидно, что качество и надежность датчиков-реле во многом зависят от применяемого в них чувствительного элемента. Поэтому на ЗАО «Орлэкс» непрерывно идут научно-исследовательские и технологические работы по повышению качества и технологичности производства биметаллических элементов.

В ходе этих работ был выявлен целый ряд факторов, которые оказывают непосредственное влияние на качество биметаллического чувствительного элемента. Все эти факторы можно разделить на две основные категории: параметры технологического процесса и параметры исходного материала. В ходе экспериментальных исследований выявлено, что даже при выдерживании самых жестких требований к стабильности технологических параметров производства, не всегда удается обеспечить требуемую стабильность параметров готовых изделий. Это позволяет сделать вывод, что дальнейшее повышение качества продукции может быть обеспечено только повышением качества исходного материала. Одним из методов повышения качества материала является проведение дополнительного его входного контроля по параметрам, характеризующим показатели качества готового биметаллического элемента. В ходе анализа процессов, происходящих в работающем биметаллическом элементе, была выявлена взаимосвязь между механическими характеристиками готового элемента и такими характеристиками исходного материала, как модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения и

толщина каждого из слоев, а также соотношением этих величин. Перечисленные механические характеристики зависят от химического состава и внутренней микроструктуры материала. Приведенный ряд влияющих параметров, вероятно, неполный, поскольку рассмотрение работы биметаллического элемента с точки зрения протекания в нем механических процессов не является исчерпывающим.

Характеристики готового изделия могут быть описаны интегральной функцией нескольких параметров. Влияние каждого параметра может не носить существенного значения, однако вариации нескольких из них может привести к значительному разбросу параметров изделия. Контроль каждого параметра – это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Для ряда величин неразрушающий контроль принципиально невозможен. Возникла потребность в разработке метода контроля усредненного показателя качества материала, который позволил бы достоверно прогнозировать качество готового изделия еще на этапе входного контроля материала. Для этого выбран метод контроля термоэлектрической способности слоев исходного материала, который хорошо зарекомендовал себя в области диагностики и контроля механически и структурных параметров, что связано с зависимостью термоэлектрической способности материала от множества параметров, описывающих его физико-химические свойства. В настоящее время разработано множество методов качественной оценки материалов на основе термоэлектрических эффектов, многие из которых успешно используются. Все это позволяет говорить о перспективности применения данного метода к решению поставленной задачи.

С целью проверки целесообразности применения термоэлектрического метода для контроля исходного биметаллического материала был проведен эксперимент по установлению зависимости параметров готового изделия от термоэлектрических свойств исходного материала. Объектом эксперимента служили две партии заготовок биметаллических хлопающих мембран по 15 шт в партии. Была измерена термоэлектрическая способность каждой заготовки с обеих сторон в 4 точках. Полученные значения показали, что средние термоэлектрические способности двух слоев взаимосвязаны, а зависимость может быть описана линейной функцией следующего вида:

$$S_A = k \cdot S_P + b, \quad (1)$$

где  $S_A$ ,  $S_P$  – соответственно, термоэлектрические чувствительности активного (пассивного) слоев.

В первой партии заготовок коэффициент  $k$  составил 0,698; во второй – 0,658. Дисперсия экспериментальных данных от теоретической зависимости (1) составила в первой партии 0,412; во второй – 0,199. Наличие такой взаимосвязи между коэффициентами  $S_A$  и  $S_P$  позволяет использовать для характеристики термоэлектрических свойств материала какой-либо один из них как независимую величину.

Далее заготовки прошли установленный на пред-

поющих биметаллических мембран. Обе партии проходили технологический процесс независимо, с разницей во времени в одну неделю. Такое различие во времени привело к разнице некоторых параметров техпроцесса, что привело к значительным различиям температурных параметров партий, хотя при их изготовлении с максимально возможной точностью поддерживалось постоянство параметров техпроцесса.

После изготовления мембран были проверены температуры их срабатывания. Прямой зависимости между термоэлектрической способностью заготовок и температурами срабатывания готовых дисков установить не удалось. Однако в обеих партиях отмечена взаимосвязь между модулем отклонения термоэлектрической способности от среднего значения и модулем отклонения температур срабатывания мембран от средних значений, как для верхней температуры, так и для нижней температуры срабатывания мембраны. В таблицах 1 и 2 приведены значения модуля отклонения термоэлектрической способности активного слоя от среднего значения и модуля отклонения температур срабатывания мембран от средних значений для обеих партий.

Таблица 1 – Партия №1

Модуль отклонения термоэлектрической чувствительности	Модуль отклонения температуры срабатывания	
	верхней	нижней
0,272272	3,794	7,244
1,259352	4,606	1,644
1,428444	6,706	5,556
1,963397	6,406	27,156
1,624632	9,894	10,344
2,859321	0,594	16,544
2,413259	6,306	10,056
3,443897	1,206	12,656
3,44923	0,306	0,356
2,717548	1,694	0,944
2,221302	5,806	22,456
0,196973	3,794	6,244
1,314211	5,694	9,944
0,639063	0,206	6,556
1,424881	0,206	0,944

Из каждой партии были отобраны 8 мембран, которые имели максимальные значения модуля отклонения термоэлектрической чувствительности активного слоя от соответствующего среднего значения. Было решено оценить процент выхода годных изделий в каждой партии как с учетом дисков из сформированных групп, так и без них. В качестве критерия годности готовых мембран была установлена величина максимального отклонения температур срабатывания от средних значений, равная 2 °С.

В результате в отобранные группы дисков с максимальным отклонением в значениях термоэлектрической чувствительности не попал ни один годный диск. Так как размер партий без учета этих групп уменьшался в 2 раза, то и значение процента выхода годных изделий также удваивалось. Значение процента выхо-

да составило в первой партии 6,66 % (с учетом всех дисков) и 12,5 % (без учета отобранных дисков). Во второй партии – соответственно, 18,75 % и 37,5 %.

Таблица 2 – Партия № 2

Модуль отклонения термоэлектрической чувствительности	Модуль отклонения температуры срабатывания	
	верхней	нижней
0,038166	5,397	1,384
0,518172	4,703	8,716
0,039475	0,397	1,016
0,135739	1,703	3,766
0,037905	0,803	1,984
0,236538	1,697	2,884
0,227029	4,397	2,784
0,165644	2,503	2,116
0,144188	1,803	0,716
0,166538	1,403	3,516
2,169079	2,453	1,284
0,42723	1,103	3,016
0,360019	2,597	0,016
0,270383	1,503	5,384
0,208987	5,697	10,384

Таким образом, можно говорить о целесообразности сортировки заготовок по термоэлектрическим свойствам. Это позволит позволить снизить затраты на производство биметаллических хлопающих мембран благодаря экономии средств на производство заведомо бракованных изделий.

Следует отметить, что с увеличением ширины допуска эффективность данного метода снижается, поскольку в партии отбракованных по термоэлектрической

способности дисков начинают попадать мембраны с годными температурными характеристиками. Несмотря на это, процент выхода годных изделий при применении сортировки стабильно выше процента выхода годных изделий без применения сортировки. Так, при величине допуска в 4 °С процент выхода годных изделий в первой партии без сортировки составил 20 %, с использованием сортировки 25 %, а во второй партии – соответственно, 68,75 % и 75 %.

В случае допуска, превышающего 3 °С, в число отбракованных по термоэлектрической способности дисков попадают и те изделия, которые имеют годные температурные характеристики. То есть, с увеличением допуска общий процент годных дисков, получаемых с использованием сортировки, ниже, чем без ее применения. При снижении величины допуска ниже 2 °С выход годных мембран также резко снижается, а оценка применимости данного метода становится затруднительной и требует дополнительной проверки. Поэтому можно отметить, что для материала, использованного в эксперименте, термоэлектрический метод контроля биметаллических дисков наиболее целесообразно применять при допуске на температуры срабатывания в диапазоне от 2 до 3 °С.

В качестве перспективных направлений по улучшению термоэлектрического метода контроля биметаллических дисков следует выделить поиск методов управления параметрами технологического процесса с целью внесения компенсации отклонения температурных параметров, прогнозируемых по термоэлектрическим свойствам заготовок. Это позволило бы значительно увеличить результативность метода и повысить его экономическую эффективность.

УДК 621.318.38:675.925.035

Канд. техн. наук Косчинская Е.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: [kipra@ostu.ru](mailto:kipra@ostu.ru)

## СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ПЛОСКИХ ДВИЖУЩИХСЯ МАТЕРИАЛАХ

*The paper deals with modern methods of metal particles detection in driven linen. The logical model as well as structural scheme of detection system is considered.*

Появление посторонних металлических включений в продуктах производства характерно для многих отраслей промышленности. Металлические включения в продуктах производства зачастую являются причиной образования брака, порчи сырья и выхода из строя технологических машин. Причины

попадания металлических частиц в продукты производства различны, причем главным источником являются механизмы, на которых осуществляется различная обработка продуктов (износ режущей кромки ножей, иглодержателей, формовочной сетки и так далее). Так, например, в технологическом процессе

изготовления нетканой основы искусственной кожи иглопробивным способом в среднем за одну рабочую смену ломается 10 % игольной гарнитуры. При производительности иглопробивной машины 2500 м<sup>2</sup>/ч получается, что произведенные за смену 20000 м<sup>2</sup> полотна содержат 800 металлических включений. Наличие в полотне металлических частиц приводит к преждевременному износу иглолок, их излому на последующих операциях при иглопрокалывании, преждевременному износу ленточных ножей на двоильно-ленточной машине и значительному ухудшению качества готовой продукции – искусственной кожи. В целом проблема обнаружения и удаления посторонних металлических включений является весьма актуальной для различных отраслей промышленности [1].

В настоящее время существуют три основных способа автоматизированной очистки полотна от металлических включений: магнитный; термический; механический.

Особенностью магнитного способа автоматизированной очистки является то, что при его использовании процессы обнаружения и удаления совмещены. Существенным недостатком этого способа является то, что он позволяет производить улавливание частиц, слабо сцепленных с материалом, и не решает вопроса по очистке полотна от обломков игл, находящихся в толще материала.

Сущность термического способа автоматизированной очистки состоит в воздействии на металлическую частицу поля тока высокой частоты и постоянного магнитного поля. Металлическая частица, перемещаясь в высокочастотном поле, нагревается до большей температуры, чем точка плавления волокон, образующих полотно. Волокна, соприкасаясь с частицей, оплавляются и освобождают металлическую частицу, которая удаляется из полотна под действием постоянного магнитного поля. Использование термического способа очистки материала предполагает определение зоны расположения частицы по длине полотна, так как необходимо определять момент включения исполнительного органа. Исполнительным органом в данном случае является индуктор ТВЧ. Термический способ автоматизированной очистки полотна обладает следующими недостатками:

1) можно производить только очистку полотна, состоящего из термопластических волокон (температура плавления волокон 220-240 °С);

2) большая потребляемая мощность при работе индуктора – 40 кВт;

3) степень очистки полотна составляет 75-90%, так как практически невозможно осуществить нагрев и, следовательно, удаление металлических частиц, расположенных перпендикулярно направлению перемещения полотна.

Избавиться от недостатков, которыми обладают вышеуказанные способы очистки полотна, позволяет способ автоматизированной механической очистки, состоящий в удалении отдельного небольшого участка полотна, в толще которого находится металлическая частица. Сложностью, возникающей при ис-

пользовании этого способа, является необходимость точного определения места расположения металлической частицы в материале относительно длины и ширины полотна – координат расположения металлической частицы. Следовательно, возникает необходимость в формировании автоматизированных способов и разработке устройств, позволяющих не только фиксировать наличие металлических частиц в материале, но и определять координаты ее расположения относительно длины и ширины полотна [2].

Структурная схема автоматизированного технологического комплекса удаления металлических частиц из движущегося полотна приведена на рисунке 1, где: 1 - полотно, 2 - система предварительной очистки полотна, 3 - АСУ ТП удаления металлических частиц, 4 - датчик перемещения, 5 - система автоматического обнаружения частиц, 6 - система автоматического определения координат, 7 - блок транспортного запаздывания, 8 - исполнительный орган.

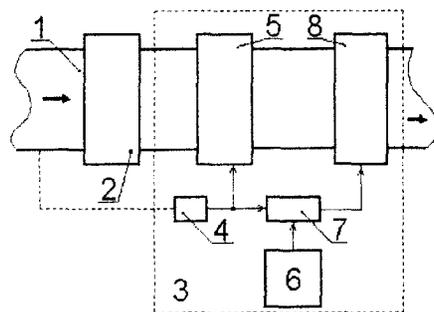


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного технологического комплекса удаления металлических частиц из движущегося полотна

АСУ ТП удаления металлических частиц из движущегося полотна является узловой АСУ и включает в себя три локальные системы: систему автоматического обнаружения, обеспечивающую получение первичной информации о наличии или отсутствии металлической частицы в полотне с помощью датчиков обнаружения; систему автоматического определения координат расположения обнаруженных частиц; систему управления, предназначенную для выработки управляющего воздействия на исполнительный орган.

В качестве исполнительного органа при использовании способа механической очистки полотна может выступать миниатюрный вырубной пресс, осуществляющий удаление некоторого участка полотна с расположенной в нем металлической частицей, или автоматический отметчик, осуществляющий пометку на полотне места расположения металлических частиц в соответствии с ранее определенной координатой частицы (на основании этих меток в дальнейшем может быть осуществлено ручное или автоматическое удаление частиц с помощью тех же миниатюрных прессов). Наличие блока транспортного запаздывания вызвано тем, что информация о параметрах объекта перемещаются синхронно с самим объектом, а после некоторого промежутка времени воздействуют на объект.

Необходимость определения координаты расположения металлической частицы накладывает свой

отпечаток на систему автоматического обнаружения. Информация, формируемая на выходе системы автоматического обнаружения, должна быть достаточной для определения координаты расположения металлической частицы в полотне. Искомый объект – металлическая частица – находится в двумерном пространстве, поэтому необходимым условием получения достаточной информации для определения координаты расположения металлической частицы в полотне является получение на выходе системы автоматического обнаружения двух различных сигналов об одной и той же частице [3, 4].

Один из вариантов структуры АСУ ТП удаления металлических частиц из движущегося полотна, включающий в себя два неподвижных непараллельных датчика обнаружения, расположенных под углом друг к другу приведен на рисунке 2, где 1, 2 – датчики обнаружения, 3 – полотно, 4 – вычислительный блок, 5 – датчик перемещения, 6 – сдвигающий регистр, 7 – конъюнкторы, 8 – блок управления, 9 – исполнительный орган.

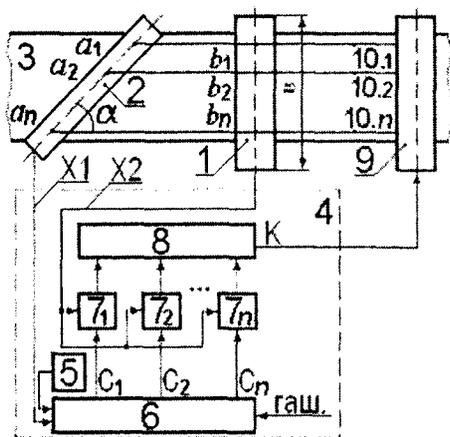


Рис. 2. Структурная схема функционирования АСУ ТП удаления металлических частиц из движущегося полотна

Значение координаты расположения металлической частицы по ширине полотна определяется выражением вида:

$$K = X1(t) \wedge X2(t + \tau_i), \quad (1)$$

где  $X1, X2$  – соответственно, сигналы, поступающие от датчиков обнаружения 1 и 2;

$\tau_i$  – интервал между моментами получения сигналов от датчиков обнаружения;

$i$  – номер зоны разбиения по ширине полотна ( $i = 1 \dots n$ ).

Численное значение координаты расположения металлической частицы для  $i$ -ой зоны по ширине полотна:

$$K_i = l_0 \cdot tg \alpha \cdot \tau_i, \quad (2)$$

где  $l_0$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность перехода от шаговых импульсов к временным запаздываниям;

$\alpha$  – угол наклона датчика обнаружения 2.

Выражение (2) применительно к данному процессу будет справедливо, если система является одноканальной, то есть в рассматриваемом участке полотна, ограниченном двумя датчиками обнаружения, находится только одна металлическая частица. При наличии в данном участке нескольких металлических частиц система становится многоканальной.

Одним из методов исследования процесса функционирования рассматриваемой системы является имитационное моделирование.

Для выявления закономерностей функционирования системы автоматического обнаружения металлических частиц в движущемся полотне и системы автоматического определения координат их расположения и получения количественного значения достоверности определения координат была разработана имитационная модель АСУ ТП удаления металлических частиц из движущегося полотна (ИМ 1).

При этом, система «полотно-иглолка» была представлена в виде совокупности отдельных элементарных вертикальных и горизонтальных зон расположения частиц  $A_{xy}$  ( $A_x$  – зона расположения по длине полотна,  $A_y$  – зона расположения по ширине полотна), которые, в свою очередь, объединены в отдельные квадратные матрицы  $A$  ( $n \times n$ ) ( $n$  – число зон разбиения полотна по ширине). В качестве объекта исследования была выбрана матрица  $A$  ( $4 \times 4$ ), так как при  $n < 4$  невозможно рассмотреть все существующие варианты взаимного расположения частиц в матрице, а при  $n > 4$  значительно возрастает объем машинного времени, нужного для рассмотрения и обработки всех возможных вариантов заполнения матрицы  $A$ .

Результаты, полученные в ходе имитационного моделирования при обработке полного массива исходной информации (65535 матриц  $A$ ), свидетельствуют о том, что при обработке информации о месте расположения металлических частиц в полотне имеет место избыточность информации. При этом количество ложных срабатываний исполнительного органа составляет 36% от общего числа срабатываний.

#### Литература:

1 Ильин С.Н., Бернштейн М.Х. Искусственные кожи. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. - 184 с.

2 Исследования по совершенствованию систем обнаружения и удаления обломков игл из основы синтетической кожи: Отчет о НИР / Орловский НИИ легмаш; Иванов Э.А., Кашин В.П., Мамонов А.П., Овчинников М.А. - Тема 71/12-80. - Орел, 1980. - 96 с.

3 Овчинников М.А. Устройство для управления рабочими органами удаления обломков игл из нетканого волокнистого материала // Оборудование для легкой промышленности. Экспресс информация. ЦНИИ ТЭИ легмаш. - 1983. - №5 - с.4-6.

4 А. С. 1348425 СССР, МКИ D 06 H 3/14. Устройство для удаления обломков игл из движущегося полотна / Мамонов А.П. (СССР) № 4008332/28-12; Заяв. 17.01.86; Опубл. 30.10.87; Бюл. № 40 - 3 с.



Экспериментальному исследованию была подвергнута листовая сталь марки Ст3, о которой априори было известно, что она обладает анизотропией пластических свойств, о чем можно судить по образованию фестонов у изделий, получаемых холодной листовой штамповкой. Объектами исследования служили шесть образцов, выполненных в виде дисков. На каждый образец была нанесена специальная разметка, разделяющая его поверхность на 12 равных секторов с углом 30°. Таким образом, в образце выделялось 12 независимых направлений и соответствующее количество контрольных точек.

Для определения анизотропии модуля упругости разработан и реализован экспериментальный стенд, позволяющий определять значение модуля упругости при испытании на изгиб. Выбор такого метода нагружения объясняется тем, что остальные методы или являются разрушаемыми, этим не позволяя проводить многократные испытания для одного образца, или методика их применения недостаточно разработана для заданной геометрической формы образца.

Схема реализации данного метода представлена на рис. 1. Образец, консольно закрепленный по диаметру  $D$ , нагружался сосредоточенной нагрузкой  $P$  на некотором расстоянии от линии закрепления.

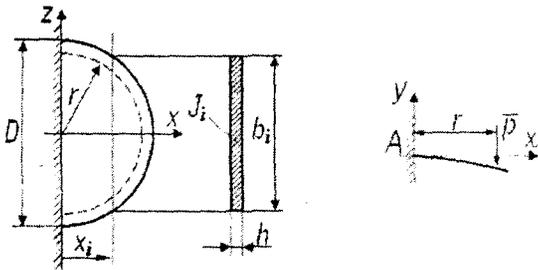


Рис. 1. Схема к определению модуля упругости образца по испытанию на изгиб

Над точкой приложения нагрузки располагалась измерительная головка, фиксировавшая начальный  $\Delta_n$  и конечный  $\Delta_k$  прогибы диска (образца), а в качестве информативного параметра выступала их разность  $\Delta$ , представляющая собой значение прогиба диска в результате приложения заданной нагрузки.

Известно, что дифференциальное уравнение оси изогнутой балки имеет вид [1]:

$$E \cdot J \cdot y'' = M(x), \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;

$J$  – осевой момент инерции сечения;

$M$  – изгибающий момент в сечении.

С учетом переменного сечения диска (испытываемого образца) получим:

$$\frac{E \cdot h^3}{6 \cdot P} \cdot y'' = \frac{x - r}{\sqrt{(D/2)^2 - x^2}}. \quad (3)$$

Решая уравнение (3), для выбранного образца и схемы нагружения, получаем аналитическое выра-

жение зависимости значения прогиба диска от расстояния до линии защемления:

$$y(x) = \frac{3P}{Eh^3} \left[ - (2r+x) \sqrt{(D/2)^2 - x^2} - ((D/2)^2 + 2rx) \times \arctan \left( \frac{x}{\sqrt{(D/2)^2 - x^2}} \right) + Dx + Dr \right]. \quad (4)$$

Принимая, что  $\Delta = y(r)$  и выражая из уравнения (4) величину модуля упругости, получим:

$$E = \frac{3 \cdot P}{h^3 \cdot \Delta} F(x), \quad (5)$$

где

$$F(x) = - (2r+x) \sqrt{(D/2)^2 - x^2} - ((D/2)^2 + 2rx) \times \arctan \left( \frac{x}{\sqrt{(D/2)^2 - x^2}} \right) + Dx + Dr. \quad (6)$$

Вращая диск вокруг оси, проходящей через его центр, получали экспериментальную зависимость значения модуля упругости от угла поворота, отсчитываемого от положения, принятого за начальное.

Для оценки анизотропии ТЭЧ использовалось устройство, реализующее принцип зондирования (рис. 2). В центр диска устанавливалось нагревательное устройство с встроенной термопарой, а зондирующая термопара последовательно перемещалась по окружности заданного радиуса с центром в точке нагрева.

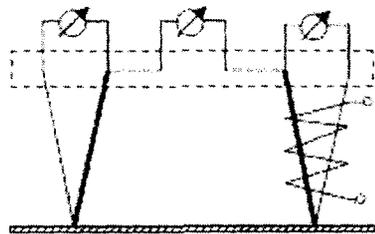


Рис. 2. Схема к определению термоэлектрической чувствительности образца

Значение термоэлектрической чувствительности материала образца определялась по формуле:

$$S_m = S_a + \frac{e_3(S_a - S_b)}{e_2 - e_1}, \quad (7)$$

где  $S_a, S_b$  – термоэлектрическая чувствительность электродов термопар;

$e_1, e_2, e_3$  – показания вольтметров;

$S_m$  – искомая ТЭЧ образца для данного положения термопар.

Так как результатом экспериментального исследования являются дискретные функциональные зависимости коэффициента ТЭЧ и модуля упругости от угла поворота, то данные функции можно рассматривать как периодические. Для установления сходства двух периодических функций может быть

использована функция взаимной корреляции, определяемая по формуле:

$$R_{fg}(\tau) = \langle f(t), g(t+\tau) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)g(t+\tau) dt, \quad (8)$$

где  $f(t), g(t)$  – периодические функции;  
 $\tau$  – взаимный временной сдвиг.

Если задать экспериментальные значения модуля упругости  $E$  и коэффициента ТЭЧ  $S$  как вектора вида:

$$E = \left\{ E_1^0, E_2^{30}, E_3^{60}, E_4^{90}, E_5^{120}, E_6^{150}, E_7^{180}, E_8^{210}, E_9^{240}, E_{10}^{270}, E_{11}^{300}, E_{12}^{330} \right\},$$

$$S = \left\{ S_1^0, S_2^{30}, S_3^{60}, S_4^{90}, S_5^{120}, S_6^{150}, S_7^{180}, S_8^{210}, S_9^{240}, S_{10}^{270}, S_{11}^{300}, S_{12}^{330} \right\},$$

то коэффициент взаимной корреляции этих параметров будет определяться из выражения:

$$r_{ES} = \frac{\text{Cov}(E, S)}{\sigma_E \sigma_S}, \quad (9)$$

где  $\sigma_E, \sigma_S$  – соответственно, дисперсии  $E$  и  $S$ ;  
 $\text{Cov}(E, S)$  – ковариация векторов  $E$  и  $S$ .

Если обозначить через  $x_i$  и  $y_i$  компоненты вектора ТЭЧ и модуля упругости, то тогда

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad \sigma_S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (11)$$

Чем ближе по модулю коэффициент взаимной корреляции к 1, тем функции более «похожи».

Сдвигая значения ТЭЧ относительно значений модуля упругости и определяя коэффициент их взаимной корреляции  $r_{ES}$  для каждого положения диска, получаем его зависимость от угла взаимного сдвига

или фазовую корреляцию, графики которой для исследуемых образцов представлены на рис. 3.

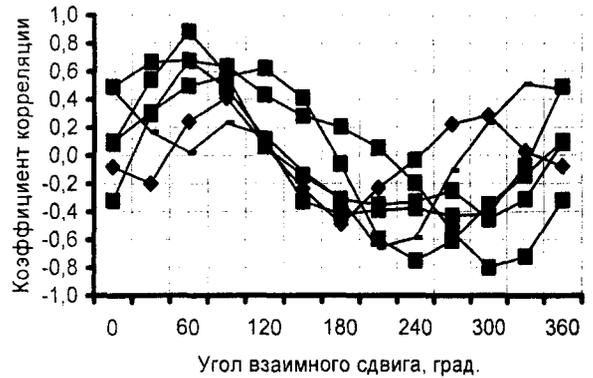
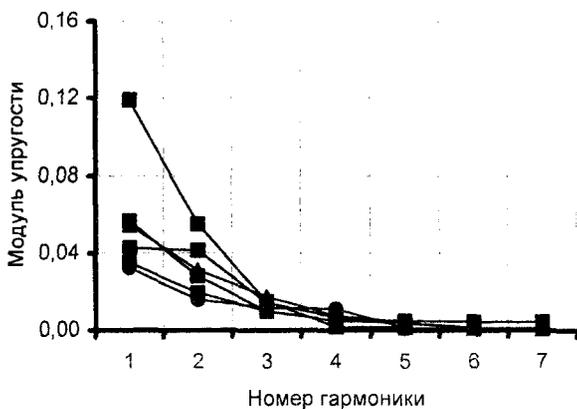


Рис. 3. График зависимости  $r_{ES}$  в зависимости от угла взаимного сдвига  $E$  и  $S$

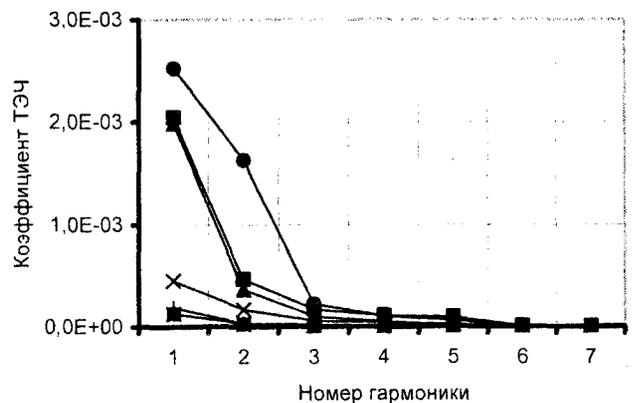
Из анализа полученного графика видно, что максимальные значения  $r_{ES}$  достигают 80 %; при этом существует некоторая группировка этих значений в области взаимного сдвига фаз на углы 60° и 240°.

Для количественной оценки взаимосвязи изменения коэффициента ТЭЧ и модуля упругости определялась их амплитудная корреляция, которая оценивалась по величине размаха, т.е. разности максимального и минимального значений. Так как зависимости заданы дискретно, то для получения их аналитического выражения использовалась аппроксимация усеченным рядом Фурье. Номер максимальной гармоники при этом должен быть минимальным, так как его повышение будет уменьшать ошибку аппроксимации, но не будет иметь физического смысла. Поэтому выбор номера гармоники осуществлялся на основе зависимости ошибки аппроксимации экспериментальных данных усеченным рядом Фурье от значения номера максимальной гармоники (рис. 4).

Для ТЭЧ искомое значение принято равным двум, а для модуля упругости – трем. На основании аналитического описания экспериментальных данных



а)



б)

Рис. 4. Графики зависимости ошибки аппроксимации экспериментальных данных по определению модуля упругости (а) и коэффициента термоэлектрической чувствительности (б) усеченным рядом Фурье в зависимости от номера наивысшей гармоники

определялись глобальный максимум, минимум функции и ее размах, как разность найденных значений. Откладывая на осях найденные значения размаха для коэффициента ТЭЧ и модуля упругости, получаем их корреляционную зависимость по амплитуде (рис. 5).

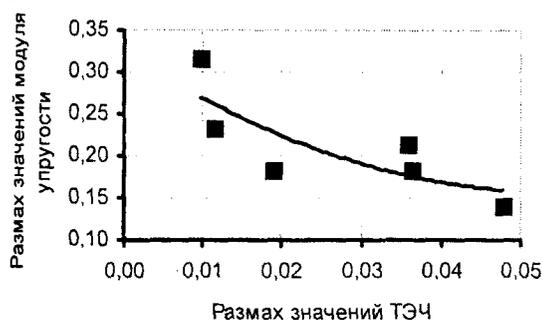


Рис. 5. Корреляционная зависимость относительных значений размаха ТЭЧ и модуля упругости

Характерной особенностью полученной зависимости, является обратная зависимость значения анизотропии модуля упругости и ТЭЧ. Для аппроксимации полученных данных использовался полином второй степени, при этом коэффициент детерминации составил около 62 %.

УДК 621.317:536.2

Канд. ф.-м. наук, доц. Корнеев Е.Ф., асп. Вержников С.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)426087; E-mail: sergeyv666@yandex.ru

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕРЕХОДА

*In article was considering the method of measurement thermal resistance junction-to-case of semiconductors power elements based on equality the p-n junction temperatures under different power dissipated. His principle and example of realization was describing. For given method was analyzing the parameters are on measurement accuracy and was recommending the heat sink selection for minimization the measurement accuracy.*

Тепловое сопротивление определяет предельные характеристики силового модуля по передаче мощности с условиями тепловых ограничений. Предельные характеристики (ток, напряжение, мощность) ограничиваются максимальной температурой кристалла полупроводникового прибора, которая не должна быть превышена ни при каких режимах работы полупроводникового прибора. Зная реальное сопротивление модуля, можно определить предель-

Полученная зависимость может быть использована для разработки на ее основе метода неразрушающего контроля и определения анизотропии модуля упругости. При этом возможно получение его абсолютных значений и оценка пространственной ориентации в материале, что затруднительно осуществить уже существующими методами.

### Литература:

- 1 Фридман Я. Б. *Механические свойства металлов*. Изд. 3-е. В двух частях. Часть 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974.
- 2 Анизотропия физических свойств металлов. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшов Е.А. - М.: Металлургия, 1985.
- 3 Аишкенаси Е.К., Ганов Э.В. *Анизотропия конструкционных материалов*. Л.: Машиностроение, 1972.
- 4 Анизотропия механических свойств материалов. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. - М.: Металлургия, 1969.
- 5 Най Дж. *Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц*. - М.: Мир, 1967.
- 6 Текстуры металлических материалов. Вассерман Г., Гревен И. - М.: Металлургия, 1969.

ные ток и рассеиваемую мощность, при которых не будет превышена предельная температура полупроводниковых элементов силового модуля. С другой стороны, параметр теплового сопротивления может служить показателем качества производственного процесса изготовления силовых модулей.

Тепловое сопротивление  $R_{th}$  определяется как отношение разности эффективной температуры полупроводникового кристалла (перехода)  $T_j$  и температу-

ры в контрольной точке к рассеиваемой мощности прибора в установившемся режиме [1]. Для теплового сопротивления переход-корпус  $R_{thjc}$  температурой в контрольной точке является температура  $T_c$  основания силового модуля непосредственно под кристаллом:

$$R_{thjc} = \frac{T_j - T_c}{P} \quad (1)$$

Одним из методов измерения  $R_{thjc}$  является метод «постоянной температуры перехода» [2]. Измерение проводится в два этапа.

На первом этапе на переход подается мощность  $P_1$ , достаточно сильно нагревающая кристалл. После достижения теплового равновесия системы фиксируют температуру корпуса под кристаллом:

$$T_{c1} = T_{j1} - R_{thjc} \cdot P_1 \quad (2)$$

На втором этапе силовой модуль принудительно охлаждается, вследствие чего температура перехода начинает уменьшаться. Одновременно мощность, подводимую к переходу, увеличивают так, чтобы при некотором ее значении  $P_2$  температура перехода сравнялась с его температурой на первом этапе.

Равенство температур перехода определяется по равенству прямых напряжений на переходе при определенном «измерительном» токе ( $\approx 100$  мА). После достижения теплового равновесия системы фиксируется температура корпуса:

$$T_{c2} = T_{j2} - R_{thjc} \cdot P_2 \quad (3)$$

Т.к.  $T_{j1} = T_{j2}$ , а мощности  $P_1, P_2$  и температуры  $T_{c1}, T_{c2}$  известны, то из уравнений (2) и (3) можно получить значение теплового сопротивления:

$$R_{thjc} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{P_2 - P_1} = \frac{\Delta T_c}{\Delta P} \quad (4)$$

Преимущество описанного метода заключается в его универсальности, т.к. он может использоваться для измерения теплового сопротивления силовых модулей на основе любых полупроводниковых элементов. Недостаток – необходимость дважды добиваться теплового равновесия системы.

Одним из достаточно простых способов достижения равенства температур перехода при различных рассеиваемых мощностях является изменение степени охлаждения силового модуля, например, за счет изменения скорости вращения вентилятора, обдувающего охладитель модуля (либо изменение скорости потока жидкости при жидкостном охлаждении). Указанную схему измерения поясняет рис. 1.

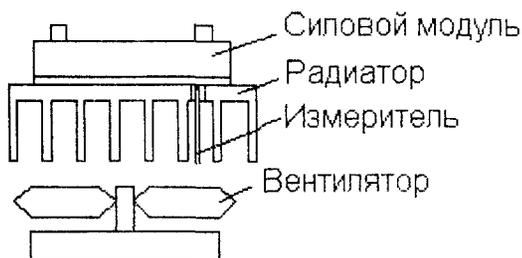


Рис. 1. Схема измерительного стенда

При использовании подобной схемы измерений возникает задача оптимального выбора охладителя с целью минимизации погрешности измерения.

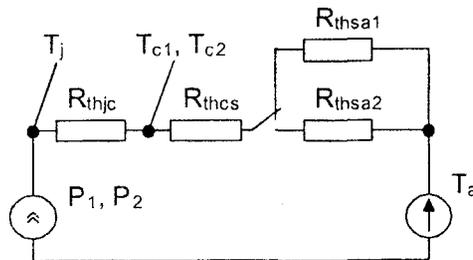
Стандартное отклонение косвенного измерения для функции двух переменных  $f(X, Y)$  определяется известной формулой [3]:

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X} \cdot S_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y} \cdot S_y\right)^2} \quad (5)$$

На практике более удобно использовать относительное стандартное отклонение  $S/f(X, Y)$ , позволяющее с заданной вероятностью определить относительную погрешность измерения. Для формулы (4) относительное стандартное отклонение имеет вид:

$$\frac{S}{R_{thjc}} = \sqrt{\left(\frac{S_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{S_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2} \quad (6)$$

Рассмотрим эквивалентную тепловую модель измерительного стенда, показанную на рис. 2.



$T_a$  – температура охлаждающего реагента;  $R_{thsa1}, R_{thsa2}$  – тепловые сопротивления охладитель-окружающая среда при различных режимах охлаждения

Рис. 2. Эквивалентная тепловая модель измерительного стенда

В соответствии со схемой измерения и тепловой моделью можно записать следующие соотношения:

$$T_j = P_1(R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa1}) = P_2(R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa2});$$

$$T_{c1} = T_a + P_1(R_{thcs} + R_{thsa1});$$

$$T_{c2} = T_a + P_2(R_{thcs} + R_{thsa2}).$$

Выразим из них  $\Delta P$  и  $\Delta T_c$  через мощность  $P_1$ :

$$\Delta P = P_2 - P_1 = P_1 \frac{R_{thsa1} - R_{thsa2}}{R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa2}};$$

$$\Delta T_c = T_{c1} - T_{c2} = P_1 \frac{R_{thjc} (R_{thsa1} - R_{thsa2})}{R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa2}}.$$

После подстановки в формулу (6) получим

$$\frac{S}{R_{thjc}} = \frac{R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa2}}{P_1(R_{thsa1} - R_{thsa2})} \sqrt{\left(\frac{S_{\Delta T}}{R_{thjc}}\right)^2 + S_{\Delta P}^2} \quad (7)$$

Очевидно, что чем больше мощность  $P_1$ , рассеиваемая силовым элементом на первом этапе измерения, тем меньше будет погрешность, но мощность  $P_1$  ограничивается максимально допустимой температурой перехода  $T_{jmax}$  и в пределе может быть равна:

$$P_1 = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa1}}$$

Подстановкой этого выражения в формулу (7) получаем итоговую формулу погрешности измерения:

$$\frac{S}{R_{thjc}} = \frac{(R_{thjc} + R_{thjcs} + R_{thsa1})(R_{thjc} + R_{thjcs} + R_{thsa2})}{(T_{jmax} - T_a)(R_{thsa1} - R_{thsa2})} \times \sqrt{(S_{\Delta f} / R_{thjc})^2 + S_{\Delta P}^2}$$

Очевидно, что уменьшение температуры окружающей среды (охлаждающего реагента)  $T_a$  и теплового сопротивления корпус-охладитель  $R_{thcs}$  способствует уменьшению погрешности измерения.

Рассмотрим подробнее часть выражения в формуле, стоящего перед корнем и связывающего погрешность измерения с тепловыми сопротивлениями охладителя, обозначив  $R_{thsa2} = R_{thsa1} / n$ :

$$f(R_{thsa1}, n) = \frac{(R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa1})(R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa1} / n)}{(R_{thsa1} - R_{thsa1} / n)} \quad (8)$$

Отношение  $R_{thsa1} / R_{thsa2} = n$ , зависит, прежде всего, от изменения интенсивности обдува охладителя и остается постоянным для охладителей определенной конструкции [4]. Рис. 3 показывает поведение функции  $f$  при различных значениях  $R_{thsa1}$  и  $n$ .

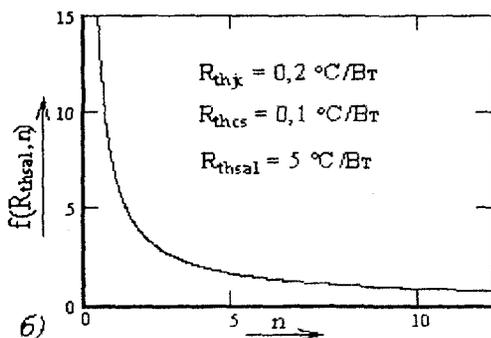
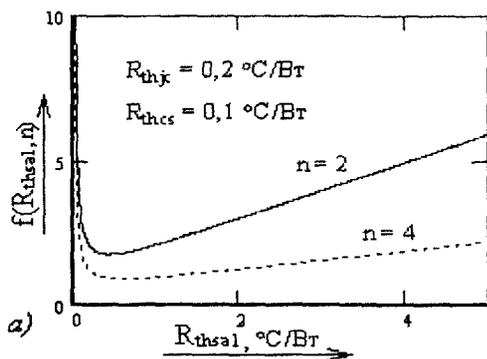


Рис. 3. Графики функции  $f(R_{thsa1}, n)$

Анализ показывает, что функция (8) при

$$R_{thsa1} = \sqrt{n}(R_{thjc} + R_{thcs}) \quad (8)$$

принимает свое минимальное значение (при постоянном значении  $n$ ):

$$f(n) = (R_{thjc} + R_{thcs}) \frac{(\sqrt{n+1})^2}{n-1} \quad (9)$$

Т.е. минимальное значение погрешности измерения зависит не от абсолютных значений тепловых сопротивлений охладителей, а от их отношения.

При возрастании  $R_{thsa1}$  функция  $f$  асимптотически приближается к прямой:

$$f(R_{thsa1}, n) = (R_{thjc} + R_{thcs}) \frac{n+1}{n-1} + \frac{R_{thsa1}}{n-1} \quad (10)$$

Графики на рисунке 3, а показывают, что:

1 Рост  $n$  приводит к абсолютному уменьшению функции  $f$ , т.е.  $f(R_{thsa1}, n_1) < f(R_{thsa1}, n_2)$  при  $n_1 < n_2$  для любого значения  $R_{thsa1}$ . Это доказывает важность увеличения  $n$  для уменьшения погрешности измерения. Увеличение  $n$  приводит также к меньшему возрастанию погрешности при увеличении  $R_{thsa1}$ , что объясняется коэффициентом пропорциональности в уравнении асимптоты (10). Зависимость  $f(R_{thsa1}, n)$  от  $n$  при постоянном значении  $R_{thsa1}$  представляет собой обратную пропорциональность (рис. 3, б).

2 Уменьшение  $R_{thsa1}$  относительно оптимального значения приводит к резкому возрастанию погрешности, что связано с уменьшением по абсолютному значению  $\Delta P$  в формуле (4).

Проведенный анализ позволяет дать рекомендации по выбору охладителя и проведению измерения теплового сопротивления данным методом:

- при выборе конструкции охладителя и режимов охлаждения следует стремиться обеспечить максимум соотношения  $R_{thsa1} / R_{thsa2} = n$ ;
- необходимо стремиться к минимизации теплового сопротивления корпус-охладитель  $R_{thcs}$ ;
- следует выбирать значение  $R_{thsa1}$  максимально близким к  $\sqrt{n}(R_{thjc} + R_{thcs})$ , но не допускать его уменьшения относительно оптимального значения;
- следует обеспечивать минимальную температуру окружающей среды (охлаждающего реагента)  $T_a$ .

**Литература:**

1 ГОСТ 25529-82 (СТ СЭВ 2768-80) Диоды полупроводниковые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.  
 2 Лаппе Р., Фишер Ф. Измерения в энергетической электронике: пер. с нем. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 232 с.  
 3 Шишкин И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. - М.: Изд-во стандартов, 1990.  
 4 Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. Метод эквивалентов. - М.: Радио и связь, 1983. - 184 с.



Д-р. наук, проф. Коробко В.И., канд. техн. наук, ст. преп. Калашникова Н.Г.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ПЛАСТИНОК – ЭЛЕМЕНТ САПР ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*The article shows that the basic integral physical characteristics of membranes (maximum deflection at transverse curve, critical force at longitudinal curve, destructive loading at elastic-plastic stage) are functionally connected with their basic frequency of the free vibrations. All these characteristics have their geometric analog – the form coefficient. The investigation of the corresponding physical problems results in the investigation of the form coefficient changes at various geometric transpositions. It is recommended to use this community at working out the Auto Projecting System elements connected with quality control of building constructions at their production and definition of integral physical parameters at their exploitation.*

### Вводные замечания

Упругие тонкие пластинки являются весьма распространенными элементами строительных и машиностроительных конструкций. Находясь в сооружении (здании или техническом устройстве) под воздействием статических и динамических нагрузок они испытывают деформации поперечного и продольного изгибов. Контроль качества таких конструкций при изготовлении, а также определение их интегральных физических характеристик непосредственно в условиях эксплуатации является весьма важной научно-технической проблемой. Для ее решения в настоящее время проводятся интенсивные работы по созданию систем автоматизированного проектирования, включающих в себя комплекс разнообразных конструкторских и эксплуатационных задач.

При решении конструкторских задач, связанных с проектированием пластинок (назначением их геометрических размеров и определением интегральных физических характеристик), широко используются методы геометрического и физико-механического моделирования [1]. В последние годы в механике деформируемого твердого тела разработан новый эффективный метод определения интегральных физических характеристик в двумерных задачах – метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [2]. Этот метод основан на законах геометрического моделирования формы области и является, по нашему мнению, единственным методом, позволяющим среди заданного множества областей выбрать оптимальную форму с точки зрения проблемы минимакса интегральных физических характеристик. Физическую суть этого метода определяет аналогия между интегральными физическими характеристиками пластинок и интегральной геометрической характеристикой формы (коэффициентом формы  $K_f$ ), являющейся количественной мерой симметрии.

При геометрическом моделировании формы области (пластинки) изменяются ее геометрические параметры и физические характеристики. Причем интегральные физические характеристики функцио-

нально связаны с  $K_f$  области. Поэтому для изучения поведения той или интегральной физической характеристики можно не решать физическую задачу, а исследовать поведение  $K_f$  при выбранных геометрических преобразованиях. То есть, решение сложной физической проблемы сведено к решению элементарной геометрической задачи.

Для исследования поведения  $K_f$  области при различных геометрических преобразованиях в ОрелГТУ разрабатываются программные комплексы [3, 4], способные быть составными элементами САПР при проектировании пластинок, контроле параметров качества при их изготовлении и определении интегральных физических характеристик в процессе эксплуатации.

**Интегральные физические характеристики пластинок, подлежащие определению при изготовлении и в условиях эксплуатации.**

Среди важнейших интегральных физических характеристик пластинок, подлежащих контролю в процессе изготовления и эксплуатации, являются:

- жесткость при изгибе, определяемая отношением максимального прогиба  $w_0$  к длине минимального условного диаметра  $D_{min}$  (минимальной ширины);
- основная частота собственных колебаний  $\omega$  для пластинок, работающих в условиях динамического воздействия;
- критическая сила при потере устойчивости  $N_0$  для пластинок работающих в условиях продольно-поперечного изгиба;
- разрушающая нагрузка  $P_{разр}$  для пластинок, работающих в условиях упруго-пластического деформирования.

При исследовании соответствующих задач теории пластинок с помощью МИКФ были установлены зависимости [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_0 = K_w \frac{A^2 q}{K_f^2 D}; \quad \omega = K_\omega \frac{K_f}{A} \sqrt{\frac{D}{m}}; \\ N_0 = K_N \frac{K_f}{A} D; \quad P_{разр} = qA = K_D K_f. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $K_w$ ,  $K_\omega$ ,  $K_N$  и  $K_P$  – коэффициенты пропорциональности, зависящие от граничных условий пластинок;  $A$  – площадь пластинок;  $q$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки;  $m$  – масса единицы площади пластинок;  $D$  – цилиндрическая жесткость [2]. Из приведенных выражений видно, что рассматриваемые интегральные физические характеристики пластинок при одинаковой площади и толщине с точностью до физических параметров функционально зависят только от  $K_f$ .

**Взаимосвязь интегральных физических характеристик пластинок с основной частотой колебаний**

В работах одного из авторов этой статьи [5] доказано, что основная частота колебаний пластинок является интегральным критерием, с помощью которого можно оценивать и жесткость пластинок, и критическую силу, и разрушающую нагрузку. Это нетрудно показать, выразив из второго выражения системы (1)  $K_f$  и подставив его в другие формулы:

$$\omega_0 = \frac{qK_w}{\omega^2 m K_\omega^2}; N_0 = \frac{\omega K_N \sqrt{Dm}}{K_\omega}; P_{\text{дв}} = \frac{A\omega K_P}{K_\omega} \sqrt{\frac{m}{D}}. \quad (2)$$

Таким образом, при необходимости определения интегральных физических характеристик  $\omega_0$ ,  $N_0$  и  $P_{\text{дв}}$  для пластинок, находящихся в сооружении, можно не прибегать к известным трудно реализуемым методам их контроля, а получить соответствующие оценки этих характеристик по основной частоте колебаний, которая определяется намного проще, чем указанные характеристики. При этом основную частоту колебаний пластинок можно определять не в сооружении, а при их изготовлении на предприятиях строительной индустрии или машиностроения. Более того, основную частоту можно определять на моделях конструкций, как это показано в работе [6]. Это упрощение позволяет, разрабатывая элементы САПР, связанные с определением интегральных физических характеристик пластинок в условиях эксплуатации, исследовать только закономерности изменения основной частоты колебаний пластинок при

геометрическом моделировании их формы.

При разработке рассматриваемого блока задач САПР, связанных с контролем интегральных физических характеристик пластинок, особое место занимает задача оптимального выбора геометрического преобразования, объединяющего определенное подмножество форм пластинок, в которое входит пластинка заданной формы. Эту задачу предлагается исследовать путем подсчета  $K_f$  пластинок с использованием анимационной процедуры, когда, выбирая в соответствии с методикой МИКФ различные опорные фигуры, на графике наглядно представляется «путь» изменения  $K_f$  (а, следовательно, и физической характеристики). Зная общие приемы рационального выбора опорных фигур, эта задача оператором решается весьма оперативно [3].

**Примеры геометрического моделирования области**

Некоторые возможности геометрического моделирования формы области покажем на примере определения основной частоты колебаний пластинок треугольной формы. На рис. 1 приведен график изменения параметра  $1/K_f$  в зависимости от изменения правого угла при основании треугольников при аффинном растяжении (сжатии) равностороннего треугольника.

На этом графике точка 2 соответствует правильному треугольнику, точка 1 – равнобедренному прямоугольному треугольнику, кривая 0-1 – равнобедренным тупоугольным треугольникам, кривая 1-2-3 – равнобедренным остроугольным треугольникам, кривая 1-3 – прямоугольным треугольникам. Каждую из указанных кривых можно связать с аффинными преобразованиями. Так, кривая 1-0 соответствует аффинному сжатию равностороннего треугольника вдоль высоты, проведенной к основанию (рис. 2, а); кривая 1-2-3 – его аффинному растяжению вдоль высоты (рис. 2, б); кривая 1-3 соответствует геометрическому преобразованию равнобедренного прямоугольного треугольника таким образом, что его вершина смещается вправо по дуге окружности с центром, лежащим на гипотенузе (аффинный сдвиг со сжатием) (рис. 2, в).

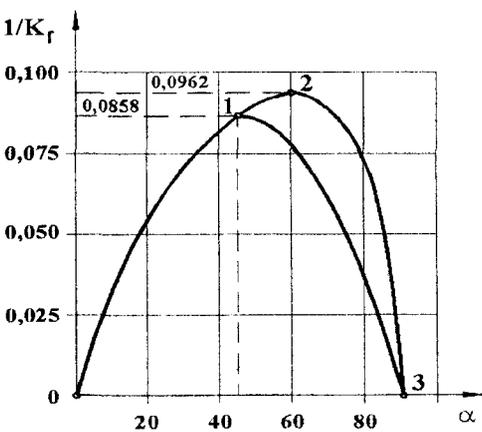


Рис. 1. График изменения параметра  $1/K_f$

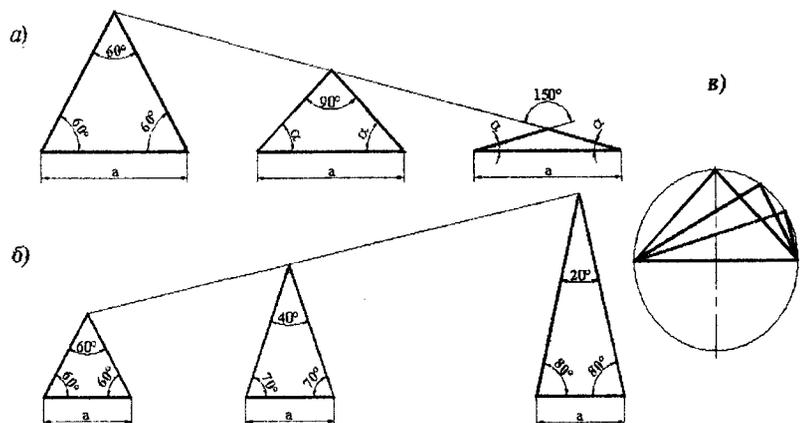


Рис. 2. Примеры преобразования пластин треугольной формы

Рассмотрим характер изменения  $K_f$  треугольников при аффинном сдвиге произвольного равнобедренного тупоугольного треугольника параллельно его основанию. Графически эта функция изображается кривой а-б-в-г-д-е-ж-з-и-к (рис. 3). Участок кривой а-

б-в-г-д строится в зависимости от угла  $\alpha$  (правый угол при основании), участок д-е-ж-з-и – в зависимости от угла  $\beta$  (угол при вершине), а участок и-к – в зависимости от угла  $\gamma$  (левый угол при основании).

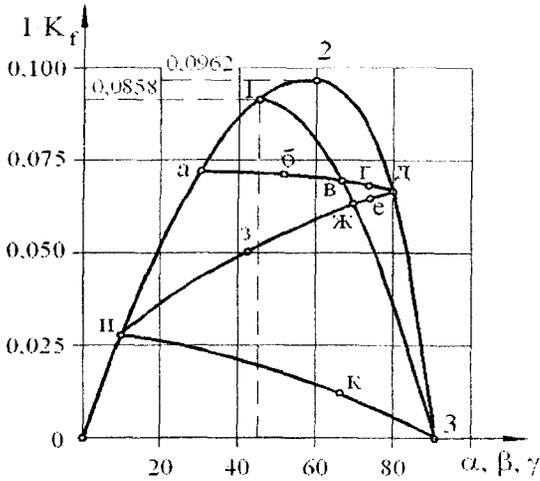


Рис. 3. Функция изменения  $K_f$  при аффинном сдвиге

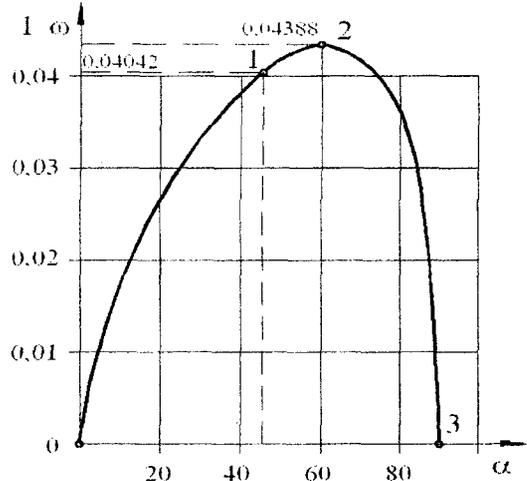


Рис. 4. График изменения параметра  $1/\omega$

На рис. 4 приведен график изменения параметра  $1/\omega$  при геометрических преобразованиях, представленных на рис. 2. Эти данные получены экспериментальным путем в диссертационной работе Н.Г. Калашниковой [7]. Сопоставление рис. 3 и 4 убедительно подтверждает приведенное выше утверждение о том, что  $K_f$  является геометрическим аналогом основной частоты колебаний пластинок. Приведенная кривая хорошо аппроксимируется функцией:

$$\omega = (a + b\alpha + c\alpha^2 + d/\alpha + e/\alpha^2) \text{ D m A}, \quad (3)$$

где  $a = 80,994$ ,  $b = -84,193$ ,  $c = 37,327$ ,  $d = -14,803$ ,  $e = 3,471$ , а значения  $\alpha$  подставляются в радианах.

Проблема использования МИКФ при разработке элементов САПР для контроля качества строительных конструкций и определения их интегральных физических характеристик заключается именно в построении граничных кривых, аналогичных приведенным на рис. 4 для подмножеств геометрических фигур определенного вида (треугольники, параллелограммы, трапеции и т.п.).

**Пример.** Требуется определить основную частоту колебаний шарнирно опертой пластинки в виде прямоугольного треугольника с углами  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\gamma = 60^\circ$  и размерами  $a \times b \times H = 33,98 \times 58,86 \times 0,2$  см, выполненную из дюралюминиевого листа (рис. 5, а).

**Решение.** Заданный треугольник можно получить путем аффинного сдвига параллельно основанию из равнобедренного тупоугольного треугольника с углом при вершине  $\beta = 98,20^\circ$  ( $\alpha = 40,90^\circ$ ,  $K_f = 12,460$ ). При таком преобразовании (рис. 5, б) получается также равнобедренный остроугольный треугольник с углом при вершине  $\beta = 25,66^\circ$  ( $\alpha = 77,17^\circ$ ,  $K_f = 13,795$ ).

По формуле (3) находим опорные решения:

$$\omega_1 = 25,99 \text{ D m A}; \quad \omega_2 = 26,23 \text{ D m A}.$$

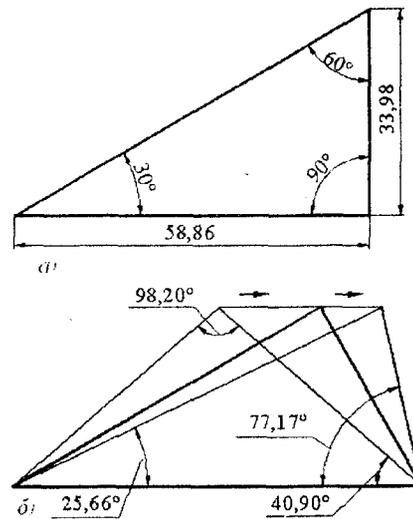


Рис. 5. К примеру расчета основной частоты колебаний пластины

Используя методику МИКФ [2], заключающуюся в интерполировании граничных решений по коэффициенту формы области, и представляя искомое решение в виде степенной функции, получим:

$$\omega_1 = K \cdot K_{f1}^n; \quad \omega_2 = K \cdot K_{f2}^n;$$

$$n = \frac{\ln(\omega_1 / \omega_2)}{\ln(K_{f1} / K_{f2})} = \frac{\ln(25,99 / 26,23)}{\ln(12,460 / 13,795)} = 0,092;$$

$$K = \frac{\omega_1}{K_{f1}^n} = \frac{25,99}{12,460^{0,092}} = 20,61;$$

$$\omega = 20,61(K_f)^{0,092} \text{ D m A}.$$

Подставляя в эту формулу значение коэффициента формы для заданной пластинки в виде прямоугольного треугольника ( $K_f = 12,928$ ), находим:

$$\omega = 26,08 \text{ D m A} = 819,53 \text{ c}^{-1}, \quad f = 130,99 \text{ Гц},$$

что отличается на 1,89 % от известного точного аналитического решения [2]:

$$\omega = 26,58 \text{ D m A} = 835,24 \text{ c}^{-1}, \quad f = 132,93 \text{ Гц}.$$

Таким образом, процедура геометрического моделирования формы пластинок может стать одним из важнейших элементов САПР при решении технологических задач, связанных с контролем качества и определения интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

**Литература:**

1 Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций. - М.: Машиностроение, 1990. - 287 с.

2 Коробко А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости. - М.: Изд-во АСВ, 1999. - 304 с.

3 Малинкин Н.С. Развитие и применение МИКФ к расчету параллелограммных пластинок. Дисс. канд. техн. наук. - Орел, 2003. - 194 с.

4 Куржаев Ю.В. Развитие и применение МИКФ к решению задач предельного равновесия пластинок. Дисс. канд. техн. наук. - Орел, 2005. - 170 с.

5 Коробко В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода. - Т. 1. - М.: Изд-во АСВ, 1997. - 396 с.

6 Коробко В.И., Калашикова Н.Г., Савельев С.Н. Определение жесткости изгибаемых элементов конструкций в виде пластинок с помощью вибрационного метода // Контроль. Диагностика. - 2003. - № 11. - С. 49-53.

7 Калашикова Н.Г. Физическое и геометрическое моделирование пластинок сложного вида при осуществлении контроля интегральных физических характеристик строительных конструкций. Дисс. канд. техн. наук. - Орел, 2005. - 135 с.

УДК 620.179

Канд. техн. наук С.Н. Савельев, С.Н. Плотников  
(Академия ФСО России),  
г. Орел, тел. (4862)418203; E-mail: [s\\_savelyev@mail.ru](mailto:s_savelyev@mail.ru)

## МЕТОДИКА ВИБРОЧАСТОТНОГО КОНТРОЛЯ ПО АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

*The clause deals with the new method of the vibrating control of the characteristics of ferro-concrete designs which are taking place under loading is considered with the purpose of check of safety of buildings and structures which are taking place in operation. The control is carried out on the resonant frequency on the basis of a known of the properties product.*

Допусковый контроль качества железобетонных изделий резонансным методом основан на измерении частоты и логарифмического декремента затухания колебаний  $\delta$  в испытуемом изделии и сравнении полученных результатов с аналогичными параметрами эталонной конструкции или модели [1]. Данный метод испытаний позволяет регистрировать резонансную частоту колебаний с погрешностью в единицы процентов [2, 3]. При его использовании для измерения частоты колебаний в конструкциях с относительно большим  $\delta$  точность измерения принципиально ограничивается как методической, так и инструментальной составляющими погрешности.

Для оценки методической погрешности при измерении частоты затухающих колебаний проведено моделирование резонансного затухающего процесса в программе MathCAD. Установлено, что при экспоненциальном понижении амплитуды затухающих колебаний  $U_M$  появляется методическая погрешность  $\gamma_M$  измерения длительности периода колебаний, осо-

бенно при больших значениях  $\delta$  и порогов срабатывания  $\pm U_{\text{ПОР}}$  формирователя импульсов. Погрешность  $\gamma_M$  увеличивается при понижении амплитуды резонансных затухающих колебаний. Каждый последующий период колебаний  $T_{X_{j+1}}$  превосходит по длительности каждый предыдущий  $T_{X_j}$  (рис. 1).

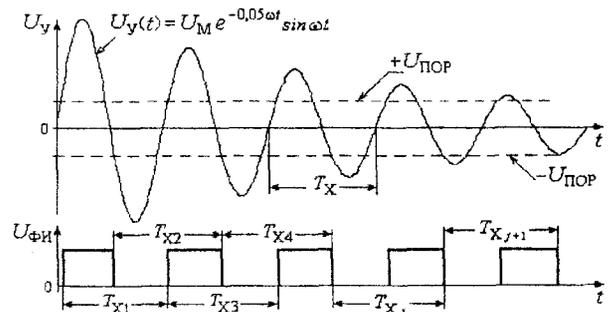


Рис. 1. Временные диаграммы процесса затухания колебаний

Согласно расчетам, результаты которых приведены в таблице 1, методическая погрешность резко возрастает при установке уровней пороговых напряжений  $U_{пор} \geq U_M$ . При значениях  $\delta > 0,1$  практически представляется возможность измерения длительностей только нескольких первых (трех – четырех) периодов, так как в дальнейшем амплитуда колебаний становится ниже пороговых уровней срабатывания триггера Шмитта, на котором реализован формирователь импульсов, и формирование импульсов прекращается.

Согласно данным таблицы 1, на значения методической погрешности измерения периодов оказывает влияние форма и начальная амплитуда  $U_M$  колебаний.

Таблица 1 – Зависимость методической погрешности измерения периода от параметров колебаний

Погрешность, %	Обозначения периодов колебаний								Параметры	
	$T_{X1}$	$T_{X2}$	$T_{X3}$	$T_{X4}$	$T_{X5}$	$T_{X6}$	$T_{X7}$	$T_{X8}$	$U_{пор} / U_M$	$\delta$
$\gamma_M$	0,42	0,47	0,53	0,61	0,68	0,79	0,90	1,04	0,05	0,05
	0,73	0,83	0,96	1,11	1,29	1,50	1,77	2,10	0,10	0,05
	1,37	1,61	1,90	2,26	2,74	3,39	4,37	6,19	0,20	0,05
	1,22	1,59	1,88	2,43	3,23	4,28	6,70	16,8	0,05	0,10
	1,97	2,56	3,43	4,81	13,7	–	–	–	0,10	0,10

При реальных испытаниях железобетонных конструкций методом свободных колебаний нельзя измерять длительность первого периода сразу после окончания ударного импульсного воздействия, так как резонансные колебания устанавливаются с некоторой задержкой, обусловленной переходными процессами. Вследствие этого практически невозможно обеспечить высокую точность измерения частоты известными способами измерения периодов колебаний. Поэтому необходима разработка новых алгоритмов цифровых измерений, обеспечивающих высокоточный контроль параметров  $\omega_r$  и  $\delta$  с автоматической отстройкой от мешающих факторов, в том числе от нестабильности амплитуды колебаний.

Для повышения достоверности и сокращения времени контроля частоты при исследовании изгибных затухающих колебаний железобетонных изделий предлагается новый способ измерения периодов резонансных колебаний [4, 5]. Основное отличие предлагаемого способа заключается в изменении алгоритма обработки экспериментальных данных, обеспечивающее значительное повышение точности измерений при относительно больших значениях  $\delta$ .

Согласно данному способу, выходной сигнал виброчастотного датчика усиливается и сравнивается с двумя пороговыми напряжениями разной полярности  $\pm U_{пор}$ , значения которых (по модулю) должны быть значительно меньше амплитуды  $U_M$  выходного сигнала по условию  $|U_{пор}| \leq U_M$  (рис. 2).

При этом формируются импульсы с длительностью  $\Delta T_j$ , определяемой временем изменения выходного сигнала масштабирующего усилителя между двумя пороговыми напряжениями  $+U_{пор}$  и  $-U_{пор}$ .

Длительность  $\Delta T_j$  обратно пропорциональна мгновенной амплитуде  $U_{Mj}$  каждой полуволны затухающих колебаний:

$$\Delta T_j = \arcsin\left(2U_{пор} / \omega U_{Mj}\right) \approx U_{пор} / \pi f U_{Mj} \quad (1)$$

Дополнительно сказывается и отличие частоты затухающих колебаний  $\omega$  от собственной резонансной частоты  $\omega_r$  контролируемого изделия, обусловленное влиянием параметра  $\delta$ . Так, при изменении  $\delta$  в диапазоне от 0,05 до 0,2 относительная погрешность контроля резонансной частоты по результатам измерения периодов затухающих колебаний  $\gamma_M \approx -\delta^2$  увеличивается от 0,125 до 4,0 %. Данное обстоятельство не позволяет реализовать цифровое измерение резонансной частоты затухающих колебаний методом непосредственного счета импульсов при фиксированной длительности цикла измерения.

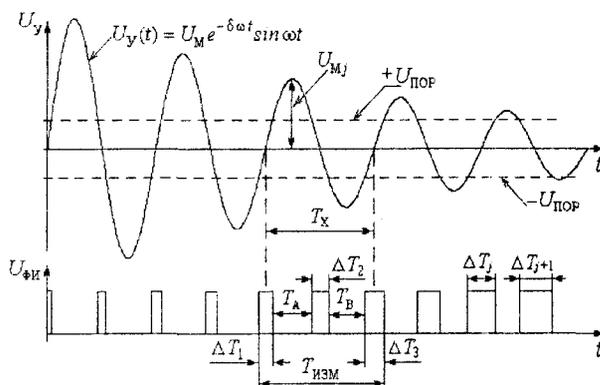


Рис.2. Временные диаграммы процесса измерения периода

Уменьшение амплитуды  $U_{Mj}$  затухающих колебаний приводит к дискретному увеличению длительности  $\Delta T_{j+1}$  каждого последующего импульса по сравнению с длительностью  $\Delta T_j$  предыдущего, что соответствует выражению (1). Изменение длительностей данных импульсов целесообразно использовать для коррекции результатов измерения периода  $\Delta T_X$  затухающих колебаний.

Согласно графикам рис. 2, начало и конец измеряемого периода  $\Delta T_X$  соответствуют середине длительности первого  $\Delta T_1$  и третьего  $\Delta T_3$  импульсов в рассматриваемом интервале  $\Delta T_{изм}$ . Следовательно, если цикл измерения начинать по фронту любого  $j$ -го импульса и заканчивать по срезу  $(j+3)$ -го импульса, то для расчета периода можно использовать выражение:

$$T_X = T_A + \Delta T_2 + \Delta T_B + 0,5(\Delta T_1 + \Delta T_3), \quad (2)$$

где  $T_A, T_B$  – длительности двух пауз между импульсами (рис. 2).

В простейшем случае цифрового измерения периода посредством его заполнения импульсами вы-

сокой опорной частоты, суммируемыми в счетчике, можно использовать менее точное выражение, основанное на линейной аппроксимации длительностей импульсов:  $\Delta T_2 \approx (\Delta T_1 + \Delta T_3) / 2$ . При таком допущении не требуется выполнять операцию умножения на дробный коэффициент, и для расчета периода  $T_X$  затухающих колебаний использовать формулу вида:

$$T_X \approx \Delta T_1 + T_A + \Delta T_B + \Delta T_3. \quad (3)$$

Фактически, при реализации формулы (3) нужно суммировать результаты измерений двух полупериодов колебаний, первый из которых начинается по фронту первого ( $j$ ) импульса и заканчивается по фронту второго ( $j+1$ ), а второй – начинается по срезу второго ( $j+1$ ) и оканчивается по срезу третьего ( $j+2$ ) импульса в цикле измерения  $T_X$  (рис. 2).

Длительность периода резонансных колебаний  $T_p$  связана с номинальным периодом затухающих колебаний  $T_{X,НОМ}$  через декремент затухания  $\delta < 1$ :

$$T_p = T_{X,НОМ} \sqrt{1 + \delta^2}$$

Вследствие этого относительная методическая погрешность измерения периода резонансных колебаний (формулы 2, 3) определяется выражением:

$$T_X - T_p \quad (4)$$

Методическая погрешность  $\gamma_M$  зависит от  $\delta$  и отношения пороговых уровней  $U_{ПОР}$  срабатывания формирователя импульсов к амплитуде колебаний  $U_M$ .

Для оценки точности определения длительности периода при исследовании затухающих колебаний, вычисляемых по приближенной формуле (2) проведен аналитический расчет погрешности  $\gamma_M$  измерения резонансной частоты колебаний. Расчет выполнен на ПЭВМ в программе MathCAD. Полученные результаты приведены в таблице 2 с целью сопоставления с данными, представленными в таблице 1.

Таблица 2 – Зависимость методической погрешности  $\gamma_M$  при оценке частоты по периодам колебаний

Погрешность, %	Обозначения периодов колебаний								Параметры	
	$T_{X1}$	$T_{X2}$	$T_{X3}$	$T_{X4}$	$T_{X5}$	$T_{X6}$	$T_{X7}$	$T_{X8}$	$U_{ПОР} / U_M$	$\delta$
$\gamma_M$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,05	0,05
	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,24	0,10	0,05
	0,52	0,54	0,58	0,64	0,79	1,20	5,07	–	0,05	0,10
	0,59	0,67	0,85	1,55	–	–	–	–	0,10	0,10

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что использование предложенных алгоритмов позволяет значительно (от 3 до 3 раз) уменьшить методическую погрешность измерения периодов  $T_X$  затухающих колебаний при одинаковых значениях  $\delta$  и  $U_{ПОР}/U_M$ .

Вычисления длительности периода колебаний  $T_X$  по формулам (2, 3) можно реализовать в цифровой форме не только с помощью микропроцессора, но и на реверсивном счетчике, выполняя умножение на коэффициент 0,5 посредством двукратного понижения частоты  $f_0$  счетных импульсов.

Формирование импульсов, длительность  $\Delta T_j$  каждого из которых обратно пропорциональна мгновенной амплитуде  $U_{Mj}$  каждой полуволны сигнала, позволяет реализовать не только точное измерение периодов, но и упростить вычисление параметра  $\delta$ .

Данное утверждение можно пояснить по графику, показанному на рис. 3, если по оси абсцисс вместо координаты времени  $t$  отложить значения текущей фазы  $\varphi = \omega t$ , выраженные в радианах. В этом случае интервал времени между однополярными амплитудами  $U_{Mj}$  и  $U_{Mj+1}$  соседних колебаний определяется значением фазового угла  $\Delta\varphi = \varphi_{j+1} - \varphi_{j+2} = 2\pi$  рад.

Учитывая, что огибающая амплитуд затухающего колебательного процесса определяется выражением:

$$U_M(t) = U_M e^{-\delta \omega t}$$

можно выразить мгновенные значения амплитуд  $U_{Mj} \dots U_{Mj+2}$  в каждом периоде колебаний через значения текущей фазы  $\varphi_j \dots \varphi_{j+2}$  и начальную амплитуду колебаний  $U_M$  в виде:

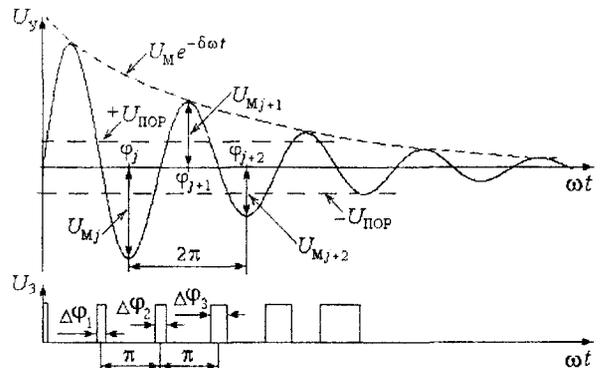


Рис. 3. Диаграммы затухающих колебаний для расчета декремента затухания  $\delta$

$$U_{Mj} = U_M e^{-\delta \varphi_j}; U_{Mj+1} = U_M e^{-\delta \varphi_{j+1}} = U_M e^{-\delta(\varphi_j + \pi)};$$

$$U_{Mj+2} = U_M e^{-\delta \varphi_{j+2}} = U_M e^{-\delta(\varphi_j + 2\pi)}.$$

Для выделения  $\delta$  необходимо определить разность между соседними однополярными амплитудами резонансных колебаний и затем выполнить операцию деления полученной разности на амплитуду первого из двух рассматриваемых колебаний.

Используя свойства экспоненциально спадающей функции, можно получить следующую формулу:

$$\delta \approx (U_{Mj} - U_{Mj+2}) / 2\pi U_M = (U_M e^{-\delta \varphi_j} - U_M e^{-\delta(\varphi_j + 2\pi)}) / 2\pi U_M e^{-\delta \varphi_j} =$$

$$= U_M e^{-\delta \varphi_j} (1 - e^{-\delta 2\pi}) / 2\pi U_M e^{-\delta \varphi_j} \approx (1 - e^{-\delta 2\pi}) / 2\pi \quad (5)$$

Приближенное выражение (5) основано на разложении в бесконечный ряд убывающей экспоненциальной функции, с учетом которого можно также вычислить  $\delta$  по формуле вида:

$$\delta \approx (1 - e^{-2\pi\delta}) / 2\pi \approx \delta - \pi\delta^2 + 2\pi^2\delta^3 / 3 - \dots \quad (6)$$

с относительной методической погрешностью вычислений  $\gamma_{\delta}$ , определяемой выражением:

$$\gamma_{\delta} \approx -(\pi\delta + 2\pi^2\delta^2 / 3 - \dots) \cdot 100\% \approx -\pi\delta \cdot 100\% \quad (7)$$

Для представления соотношений (5, 6) через фазовые длительности импульсов  $\varphi_1 \dots \varphi_{j+2}$  (рис. 3) необходимо их выразить через мгновенные значения амплитуд затухающих колебаний по выражениям:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{j+1} = \arcsin\left(\frac{2U_{j+1}\delta}{U_M}\right) \approx \dots \approx \frac{2U_{j+1}\delta}{U_M} e^{-\delta(\varphi_j + \pi)} \\ \Delta\varphi_{j+2} = \arcsin\left(\frac{2U_{j+2}\delta}{U_M}\right) \approx \dots \approx \frac{2U_{j+2}\delta}{U_M} e^{-\delta(\varphi_j + 2\pi)} \end{cases} \quad (8)$$

Если поделить разность фазовых длительностей импульсов на их сумму, то с учетом разложения в ряд экспоненциальной функции и в результате дальнейших преобразований выражения (8) можно получить формулу для приближенного расчета  $\delta$  в виде:

$$\delta \approx \frac{2(\Delta\varphi_{j+1} - \Delta\varphi_j)}{\pi(\Delta\varphi_{j+1} + \Delta\varphi_j)} \approx \dots \approx \delta \frac{1 - \pi\delta + 2\pi^2\delta^2/3}{1 - \pi\delta + \pi^2\delta^2 - 2\pi^3\delta^3/3} \quad (9)$$

Согласно (9), при расчете  $\delta$  нужно выполнить деление разности измеряемых длительностей импульсов на их сумму. Следовательно, при реализации такого алгоритма для оценки  $\delta$  достаточно измерять цифровым способом длительности импульсов и выполнять простые арифметические операции вычитания, сложения и деления (с учетом числа  $\pi$ ).

#### Литература:

- 1 Сехнашвили Э. А. Интегральная оценка качества и надежности предварительно напряженных конструкций. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
- 2 Слюсарев Г. В., Коробко В. И. Способ регистрации колебаний и разделения их на компоненты А. с. № 1516800 СССР. Бюл. № 39, 1989.
- 3 Патент № 2097727 РФ. Способ неразрушающего контроля качества готового железобетонного изделия / В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев. – Опубл. 1997, Бюл. № 33.
- 4 Коробко В.И., Савельев С.Н. Вибрационный контроль жесткости конструкций в виде балок и пластинок // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 11. – С. 49-53.
- 5 Богданов Н. Г., Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Средство экспресс-контроля качества строительных конструкций с цифровой обработкой данных // Труды V Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение", Т. 2. – М., 2003. – С. 384-385.

УДК 535.3-34

Канд. техн. наук, доц. Тарасова М.А.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419889; E-mail: martarl@yandex.ru  
Ведущий программист Бухвостова Т.Е.,  
(ЗАО «Научприбор»)  
г. Орел, тел. (4862)419587

## РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДИКО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РЕНТГЕНОФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НА СПЕКТРОМЕТРЕ СРМ 25

*This state describe new methodical-software complex for X-ray fluorescent spectrometer CPM-25. Funtioning of CRM-25 is governed by software-methodical complex, main features of which are: nj provide non-stop functioning of device, to provide carrying out of given methods of object, to carry out statistical processing of results, to contribute in working out of analyses methods. For this purpose methodical-software complex includes the following programmers: spectrometer government and maintenance, quantitative analyses, reference computing environment for x-ray analyses, statistical and metrological programmers for processing analyses results.*

Рентгенофлюоресцентный метод широко применяется на предприятиях и организациях цветной и черной металлургии, геологической и добывающей отраслей, а также при решении задач охраны окружающей среды [1].

Это обусловлено важными достоинствами метода: большим набором определяемых элементов, возможностью определения элементов в широком интервале содержаний, широким кругом анализируемых объектов, быстротой и точностью анализа, возможностью

автоматизации процессов измерения, расчета, хранения, обработки и выдачи результатов анализа. Распространению метода способствует развитие его теоретических основ, разработка новых способов анализа, создание практических методик определения отдельных элементов в конкретных объектах, серийный выпуск рентгеновской аппаратуры [2].

Анализ объектов выполняется на различных спектрометрах. При этом многие лаборатории используют аналитический комплекс СРМ-25[3].

ЗАО «Научприбор» постоянно модернизирует СРМ-25 с последующим внедрением результатов в выпускаемые аналитические комплексы. Модернизация ведется как по улучшению аппаратурных параметров, так и программно-методического обеспечения с учетом существующих разработок. В настоящее время разрабатывается новая программная оболочка, отличительной особенностью которой является возможность использования в среде Windows.

Работой рентгеновского спектрометра СРМ-25 управляет программно-методический комплекс (ПМК), основными задачами которого являются:

- 1) обеспечение бесперебойной работы прибора;
- 2) обеспечение выполнения заданной методики анализа объекта;
- 3) статистическая обработка результатов анализа;
- 4) участие в разработке методик анализа.

Для выполнения этих задач в состав ПМК входят программы:

- 1) управления и наладки спектрометра;
- 2) количественного анализа;
- 3) справочно-вычислительная среда для рентгеноспектрального анализа;
- 4) программы статистической и метрологической обработки результатов анализа.

Связь компьютера со спектрометром реализуется через один из последовательных портов COM1 или COM2 с помощью стандартного соединителя. Интерфейс пользователя выполнен в виде серии открывающихся меню, что позволяет средствами программного обеспечения выполнять все этапы анализа, поддающиеся автоматизации.

Главное меню программы, выполненное в виде горизонтальной строки, включает 7 основных пунк-

тов: конфигурация; проверка прибора; анализ; калибровка; измерение репера; аттестация; выход.

Подменю «Конфигурация» позволяет осуществить связь компьютера со спектрометром, задать каналы и определяемые элементы в них, режим работы рентгеновской трубки, указать методику анализа элементов, ее основные аналитические характеристики (рис. 1). В качестве справочного материала приводится таблица контрастностей элементов.

Подменю «Проверка прибора» обеспечивает работу механизмов и устройств спектрометра во всех измерительных режимах, расчет «мертвого» времени, снятие амплитудного распределения в спектротрических каналах, измерение и расчет основных метрологических характеристик прибора на соответствие техническим условиям и печать протокола приемо-сдаточных испытаний.

Программа количественного анализа обеспечивает аналитическую калибровку и расчет содержания элементов способом множественной регрессии, используя при этом корректировку интенсивности определяемого элемента по следующим параметрам:

- 1) относительным интенсивностям, когда

$$J_{i\delta i\delta i\delta i} = \frac{J_{i\delta i\delta i\delta i}}{J_{\delta i\delta i\delta i\delta i}}, \quad (1)$$

- 2) одному стандарту, когда

$$J_{пробы} = J_{1пробы} \frac{J_{0репера}}{J_{1репера}}, \quad (2)$$

где  $J_{0репера}$  – интенсивность стандартного образца в момент калибровки;

$J_{1репера}$  – интенсивность стандартного образца в момент стандартизации;

- 3) двум стандартам, когда

$$J_{пробы} = \alpha J_{пробы} + \beta, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – отношение разностей интенсивностей первого и второго контрольных образцов в момент калибровки и в момент стандартизации;

- 4) фоновому каналу, когда интенсивность измеряемого образца нормируется на интенсивность фонового канала.

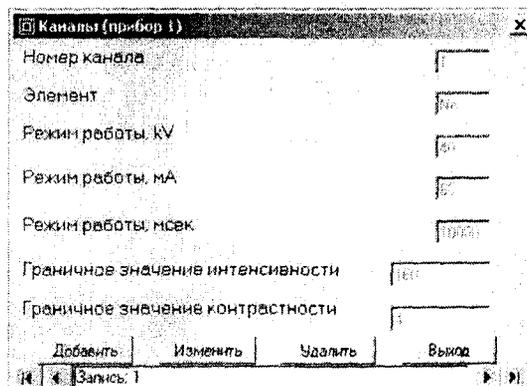
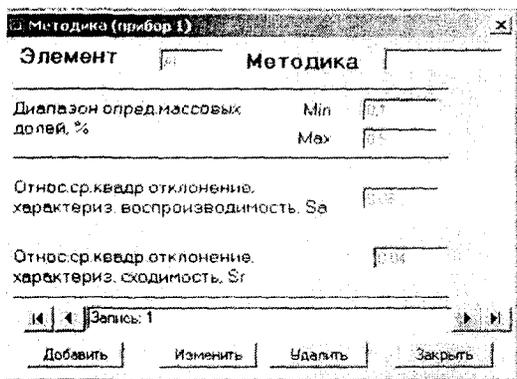


Рис.1. Элементы подменю «Конфигурация»

Градуировочная функция может быть задана уравнением множественной регрессии общего вида:

$$C_i = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i I_i + \sum_{ij} \alpha_{ij} I_i I_j + \dots, \quad (4)$$

где  $C_i, I_i$  – соответственно, содержание и интенсивность аналитической линии элемента  $i$ ;  
 $I_j$  – интенсивность аналитической линии влияющего элемента;

$\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ij}$  – эмпирические параметры, найденные методом наименьших квадратов.

Для предлагаемой модели выполняется корреляционно-регрессионный анализ. Рассчитываются коэффициенты ковариации и парной корреляции, множественной корреляции и детерминации, выборочная и остаточная дисперсии, коэффициенты Стьюдента и Фишера. Это направлено на получение в автоматическом режиме оптимальной формы регрессионного уравнения и градуировочной характеристики.

Подменю «Калибровка» позволяет сформировать банк стандартных образцов, выполнить в автоматическом режиме одну или две серии измерений интенсивностей. Программа производит контроль и отбраковку грубых выбросов в результатах параллельных измерений при одной установке образца.

Набор стандартных образцов Cr-Ni сплавы  
 Определяемый элемент Cr канал Cr

№ пробы	Концентрация		Отклонение		Интенс
	хим.	расч.	абс.	%	
1	17.3	17.863	0.563	3.25	1.088
2	25.1	24.275	0.825	3.29	1.3676
3	19.4	19.898	0.498	2.57	1.1517
4	26	25.566	0.434	1.67	1.4331
5	10.2	10.234	0.034	0.33	0.6686
6	10.3	10.321	0.021	0.20	0.6032
7	20.2	20.386	0.186	0.97	1.1468
8	23.1	23.684	0.584	2.53	1.2901
9	20.4	20.559	0.159	0.78	1.1133
10	9.8	9.225	0.575	6.53	0.5608
11	26.7	26.487	0.213	0.80	1.3864
12	17.4	17.392	0.008	0.05	1

Результаты расчета коэффициентов уравнения

A0 -1.3213E-04

После окончания измерения интенсивностей предложенной программой автоматически оценивается воспроизводимость измерения интенсивностей и ее соответствие требованиям методики.

С целью проверки работоспособности ПМК проведена калибровка многоканального спектрометра СРМ-25 по образцам Cr-Ni сплава, для количественной оценки содержания хрома. Серия из 12 образцов проанализирована при использовании трубки с палладиевым анодом (напряжение 40кВ, ток 50 мА). Каждый образец содержал 9 элементов: C, Si, Ni, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo.

С использованием программы вычислены коэффициенты уравнения регрессии, множественной регрессии и парной корреляции (рис. 2). На основании полученных результатов построены графики зависимости содержания хрома от его относительной интенсивности в стандартных образцах. Оптимальная градуировочная характеристика прибора при определении содержания хрома имеет вид, показанный на рис. 3. При этом все коэффициенты уравнения регрессии существенны для градуировочной характеристики. По окончании калибровки программа представляет отчет, сохраняемый в отдельном файле.

Матрица парных коэффициентов корреляции

	C	(Cr)	(Ni)	(Fe)
(C)	1.000	0.931	0.070	0.833
(Cr)	0.931	1.000	-0.028	-0.782
(Ni)	0.070	-0.028	1.000	-0.254
(Fe)	0.833	-0.782	0.254	1.000

Множеств. корреляц. отношение 0.9974

Фактические значения критериев Стьюдента

(Cr) Т-факт= 29.03  
 (Ni) Т-факт= 3.401  
 (Fe) Т-факт= -2.365

Закреть

Рис.2. Результаты анализа Cr-Ni сплавов

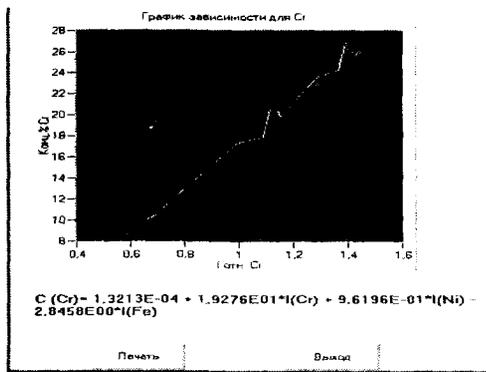


Рис.3. График зависимости интенсивности хрома от содержания в стандартных образцах

Подменю «Анализ» обеспечивает в автоматическом режиме измерение проб, контрольные измерения, расчет и вывод результатов измерений. Резуль-

таты измерений заносятся в файл и используются в дальнейшем для оценки качества выполняемых анализов соответствующих проб лабораторией.

Подменю «Аттестация» позволяет провести аттестацию методик и прибора в соответствии с ГОСТ ИСО 5725-1-6-2002 г. Оно применяется для оценки статистических характеристик методик анализа. Выполняется оценка сходимости и воспроизводимости результатов параллельных измерений, правильность результата анализа и разложение погрешности эксперимента по схеме дисперсионного анализа.

По желанию заказчика на приборе может быть выполнен анализ выпускаемой им продукции. Рассчитаны такие аналитические характеристики методики, как чувствительность, воспроизводимость и сходимость результатов анализа. Исходные данные могут быть введены также в ручном режиме.

Результаты эксперимента сохраняются в файл и могут быть выведены на печать. Дальнейшее совершенствование ПМК направлено на повышение точности и чувствительности анализа за счет усложнения алгоритмов, усиление информационной и графической поддержки, расширения пакета тестовых и сервисных программ управляющей оболочки.

#### Литература:

1 Ильин Н.П. К семидесятилетию журнала "Заводская лаборатория" и рентгеноспектрального

анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. – Т. 68. – № 1. – С. 25-37.

2 Кордюков С.В., Симаков В.А., Абрамов М.В. Методико-программные комплексы рентгенофлюоресцентного анализа - основа аналитического обеспечения ГРП // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 11. – С. 39-44.

3 Ревенко А.Г., Дабагов С.Б. Развитие рентгенофлюоресцентного анализа в России в 1999-2000 гг. (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68. – № 5. – С. 3-14.

УДК 620.17.(088.8)

Д-р техн. наук, проф. Иванов Б.Р., канд. техн. наук, доц. Богданов Н.Г., Щекотихин С.Н.

(Академия ФСО России)

г.Орел, тел. (4862) 419947

## ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ НЕМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*For an estimation of thickness of nonmagnetic coatings at the control of products it is expedient to measure two parameters – amplitude and a phase of a target signal the converter placed in a zone of the control, and to define by results of their processing parameters of a product.*

Точность измерения толщины немагнитных покрытий при контроле вихретоковым методом ограничена влиянием ряда мешающих факторов. К ним относятся: нестабильность зазора между датчиком и контролируемой поверхностью, изменение электропроводности покрытия и магнитной проницаемости ферромагнитной основы, изменение температуры окружающей среды и т.п. Для ослабления влияния неинформативных параметров на достоверность результатов контроля используют различные способы, основанные на модуляции частоты возбуждающего сигнала, одновременном измерении амплитудно-фазовых или амплитудно-частотных параметров выходного сигнала датчика, а также на применении автоматической коррекции методической и инструментальной составляющих погрешности измерений [1, 2]. При этом качество контроля зависит от применяемого способа вихретокового преобразования, схематехнических приемов построения контролирующей аппаратуры и методов аналого-цифровой обработки сигналов, сравнительно легко реализуемых на современной микроэлектронной базе.

При допусковом контроле толщины покрытий выполняют измерение двухтактным способом. Для формирования сигнала, возбуждающего вихретоковый преобразователь, сначала компенсируют его выходное напряжение при наличии в зоне контроля эталонного изделия, толщина которого значительно превышает глубину проникновения электромагнитного поля. За-

тем измеряют амплитуду и фазу выходного сигнала вихретокового преобразователя, установленного на контролируемое изделие, и по результатам их обработки определяют параметры объекта [2].

Однако при расширении диапазона контролируемых параметров точность измерения данным способом ухудшается из-за возрастания относительной инструментальной погрешности при уменьшении амплитуды выходного сигнала вихретокового преобразователя, что практически связано с увеличением электрической проводимости покрытия. Данная погрешность обусловлена нелинейностью выпрямительных элементов, применяемых для детектирования амплитуды сигнала, и нестабильностью уровней срабатывания формирователей импульсов, используемых в схеме фазометра, приводящих к резкому повышению погрешности измерения параметров малых сигналов и, как следствие, к снижению достоверности результатов контроля. Практически, точность измерения ограничивается нестабильностью электропроводности изделия. В частности, при контроле толщины медного гальванического покрытия изменение температуры на 10 °С приводит к дополнительной погрешности около 4 % из-за уменьшения электрической проводимости покрытия.

В целях ослабления влияния электропроводности используют двухчастотный способ неразрушающего контроля, согласно которому формируют высокочастотный и низкочастотный сигналы, возбуждающие

два вихретоковых преобразователя. Первый преобразователь используют для измерения удельной электрической проводимости покрытия, а второй – для измерения его толщины. По результатам детектирования параметров высокочастотного выходного сигнала первого преобразователя регулируют частоту низкочастотного возбуждающего сигнала, а толщину контролируемого изделия определяют по результатам обработки амплитудно-фазовых параметров выходного напряжения второго преобразователя [3].

Недостатком двухчастотного способа является узкий диапазон измерения, расширение которого приводит к возрастанию погрешности нелинейности из-за изменения удельной проводимости контролируемого покрытия. В частности, для стабилизации обобщенного параметра вихретокового преобразователя

$$\beta = \sqrt{2\pi\mu_0\delta f},$$

значение которого зависит от радиуса  $R_3$  эквивалентного витка индуктивной обмотки, удельной электрической проводимости  $\delta$  покрытия, абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_0$  изделия, а также от частоты  $f$  возбуждающего сигнала, в контролирующей аппаратуре необходимо реализовать обратную пропорциональную зависимость между частотой  $f$  и удельной проводимостью  $\delta$  покрытия [4].

Для получения зависимости вида  $f \approx 1/\delta$  при двухчастотном контроле используются амплитудные и фазовые детекторы с нелинейной характеристикой преобразования. При этом на амплитуду выходного сигнала вихретокового преобразователя существенно влияет зазор между контролируемой поверхностью и преобразователем, приводящий к дополнительным погрешностям измерения.

Для повышения точности измерения толщины немагнитных покрытий и исключения погрешности, обусловленной изменениями  $\delta$ , снижения влияния на результаты контроля нестабильности зазора между преобразователем и немагнитным покрытием предлагается усовершенствовать способ двухчастотного контроля, реализовав его следующим образом.

В качестве возбуждающих колебаний проще всего использовать высокочастотный и низкочастотный импульсные сигналы, подавая их соответственно на два вихретоковых преобразователя. В зависимости от измеренной амплитуды выходного сигнала первого (высокочастотного) преобразователя можно регулировать частоту возбуждающего сигнала второго (низкочастотного) вихретокового преобразователя. Затем по результатам измерения и математической обработки амплитудно-фазовых параметров выходного сигнала второго преобразователя можно определить толщину контролируемого покрытия.

Для повышения чувствительности и уменьшения энергопотребления параллельно высокочастотному преобразователю целесообразно подключить конденсатор, образуя параллельный колебательный контур. Резонансную частоту  $f_p$  контура нужно устанавливать регулировкой емкости конденсатора примерно равной частоте возбуждающего сигнала  $f_B \approx f_p$ . Для ослабле-

ния влияния зазора амплитуду  $U_M$  выходного напряжения высокочастотного преобразователя нужно детектировать и сравнить с пороговым уровнем  $U_{пор}$ . Полученный сигнал  $\Delta U = U_{пор} - U_M$  необходимо усилить и использовать для автоматической регулировки амплитуды импульсов возбуждающего сигнала.

Одновременно с операцией детектирования амплитуды в соответствии с рассматриваемым усовершенствованным способом контроля толщины покрытий нужно выделить разность фаз  $\Delta\varphi_1$  между возбуждающим и выходным сигналами высокочастотного преобразователя. Полученную разность фаз  $\Delta\varphi_1$  используют для регулировки частоты  $f_B$  возбуждающего высокочастотного сигнала до значения  $f_p \approx f_B$ , соответствующего резонансу колебательного контура. После этого следует сформировать низкочастотный возбуждающий сигнал, частоту которого  $f_H = f_B/K_d$  можно задать посредством деления частоты  $f_B$  высокочастотного сигнала на коэффициент деления  $K_d$ , учитывающий тип электропроводящего покрытия, и затем подавать низкочастотный сигнал на обмотку второго вихретокового преобразователя.

При реализации способа информативными параметрами являются амплитуда  $U_{M2}$  и фаза  $\Delta\varphi_2$  выходного сигнала второго преобразователя, по которым вычисляется толщина  $H$  контролируемого покрытия:

$$H = K_{пр}(\ln U_{M2} + K_\varphi \Delta\varphi_2), \quad (1)$$

где  $K \approx 0,8 \dots 1,2$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от  $\delta$  покрытия;

$K_\varphi$  – коэффициент преобразования устройства для выделения разности фаз (фазометра).

Включение высокочастотного вихретокового преобразователя в колебательный контур и автоматическая стабилизация амплитуды его выходного сигнала дают преимущества в плане повышения точности. Во-первых, резко уменьшается влияние нестабильности порогов срабатывания формирователей на результат выделения разности фаз  $\Delta\varphi_1$  между возбуждающим и выходным сигналами преобразователя и, как следствие, обеспечивается стабильность работы контура авторегулирования возбуждающего сигнала при малых значениях фазы  $\Delta\varphi_1 \approx 0$ . Во-вторых, при высокой добротности параллельного резонансного контура  $Q > 10$  значительно повышается его эквивалентное сопротивление, что позволяет уменьшить амплитуду (и мощность) возбуждающего сигнала. Этим обеспечивается повышение (примерно в  $Q$  раз) фазовой чувствительности, так как фаза существенно зависит от разности между резонансной  $f_p$  и возбуждающей  $f_B$  частотой:  $\Delta\varphi_1 = \arctg [2Q(f_B - f_p)/f_p]$  [4].

С учетом высокой избирательности резонансного контура для возбуждения вихретокового преобразователя можно использовать последовательность прямоугольных импульсов тока или напряжения. Частоту и скважность таких импульсов можно сравнительно легко устанавливать и регулировать цифровым способом, например, с помощью дискретных делителей частоты и управляемых генераторов.

При контроле толщины тонких немагнитных покрытий, нанесенных на ферромагнитную основу, эквивалентный резонансный контур можно получить без подключения дополнительного конденсатора к высокочастотному преобразователю. В частности, при экспериментальных исследованиях образца прибора для контроля толщины цинкового покрытия в диапазоне  $H = 5 \dots 10$  мкм, наносимого на стальном проводе диаметром  $2 \dots 5$  мм, было установлено, что на частоте  $f_B \approx 15 \dots 25$  МГц разность фазы  $\Delta\varphi_1 \approx 0$ . Данный эффект связан с компенсацией электромагнитных потерь в цинковом покрытии ферромагнитными свойствами стали. Следовательно, можно реализовать контроль толщины немагнитных покрытий (при известных конструктивных параметрах основы) не только по амплитудно-фазовым параметрам, но и по амплитудно-частотным параметрам – посредством измерения амплитуды выходного сигнала преобразователя и частоты возбуждающих импульсов при нулевом значении фазового угла  $\Delta\varphi_1 \approx 0$ .

В результате сравнительного анализа способов вихретокового контроля и различных вариантов схемотехнического построения функциональных узлов разработан и экспериментально опробован прибор для допускового контроля толщины покрытий, структурная схема которого приведена на рис. 1.

В этом приборе применены: генератор прямоугольных импульсов ГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ, вихретоковый преобразователь ВП с резонансным конденсатором С, амплитудный детектор АД, усилитель ОУ и микропроцессорный блок обработки информации БОИ. Цифровой фазометр ЦФ предназначен для выделения разности фаз между сигналами генератора импульсов ГИ и вихретокового преобразователя ВП. На операционный усилитель ОУ подается напряжение  $U_{ПОР} \approx 2,5$  В от источника опорного напряжения ИОН. Для преобразования напряжения в ток использован дифференциальный каскад на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  с регулируемым генератором тока на транзисторе  $VT3$  и резисторе  $R$ .

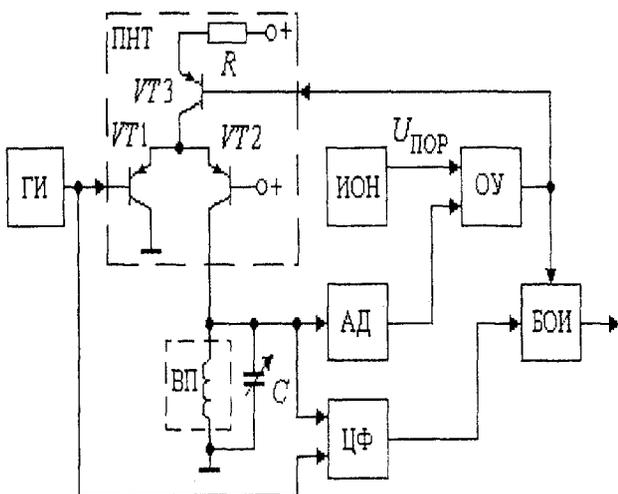


Рис. 1. Структурная схема прибора для допускового контроля толщины покрытий

При проведении контроля от генератора ГИ через преобразователь напряжения в ток ПНТ на возбуждающую обмотку вихретокового преобразователя ВП подается последовательность прямоугольных импульсов тока. Сначала преобразователь ВП устанавливают на эталонное изделие из материала ферромагнитной основы, и регулировкой резонансного конденсатора С минимизируют разность фаз между сигналом генератора ГИ и выходным напряжением вихретокового преобразователя ВП. Детектором АД выделяется разность  $\Delta U_1 = U_{ПОР} - U_{M1}$  между пороговым уровнем напряжения  $U_{ПОР} \geq 2,5$  В и амплитудой  $U_{M1}$  выходного сигнала вихретокового преобразователя ВП. Полученная разность напряжений усиливается операционным усилителем ОУ и поступает на базу транзистора  $VT3$  для регулировки тока питания дифференциального каскада ( $VT2$ ,  $VT3$ ), а также подается на блок обработки БОИ для аналого-цифрового преобразования и записи в оперативную память микропроцессора. Кроме того, цифровым фазометром выделяется начальная фаза  $\varphi_1$  выходного сигнала преобразователя ВП, которая также запоминается в блоке обработки БОИ. После этого преобразователь ВП устанавливают на поверхность контролируемого изделия и измеряют фазу  $\varphi_2$  и новую разность напряжений  $\Delta U_2 = U_{ПОР} - U_{M2}$ . После вычисления разностных значений фаз  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  и амплитуд  $\Delta U = U_{M1} - U_{M2}$  автоматически вычисляется толщина немагнитного покрытия по типовому алгоритму обработки данных в БОИ.

При изменении толщины покрытия амплитуда сигнала на выходе вихретокового преобразователя остается практически постоянной и определяется пороговым напряжением  $U_M \approx U_{ПОР}$ . Стабилизация амплитуды сигнала обеспечивается регулировкой тока ПНТ, поэтому при большом коэффициенте усиления ОУ его выходное напряжение  $U_{ОУ}$  прямо пропорционально току возбуждения  $I_B$  и сопротивлению  $Z_K$  резонансного контура:  $U_{ОУ} \approx R U_{M2} / Z_K \approx R U_{ПОР} / Z_K$ .

При этом практически исключается инструментальная погрешность цифрового фазометра ЦФ, работающего при постоянных амплитудах входных сигналов. Амплитудный детектор АД также работает на фиксированной точке диапазона измерения, чем минимизируется его инструментальная погрешность, которая компенсируется в БОИ при вычитании измеренных значений амплитуд сигналов  $U_{1M} - U_{2M}$ .

Наличие двух параметров – разности фаз и амплитуд – расширяет область применения этого способа. Допусковый контроль толщины диэлектрических покрытий можно проводить только по амплитудным параметрам сигнала, а при контроле толщины  $H$  электропроводящих покрытий совместно обрабатывать амплитудные и фазовые параметры выходного сигнала преобразователя по формуле:

$$H = K_1 \ln \Delta U_{M2} + K_2 \Delta\varphi. \quad (2)$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем для конкретных значений электрической проводимости ферромагнитной основы и контролируемого покрытия.

Наиболее перспективный способ, обеспечивающий достоверный контроль толщины немагнитных покрытий в широком диапазоне, основан на измерении амплитуды и частоты вихретокового датчика.

Сущность способа широкодиапазонного контроля толщины покрытий заключается в том, что вихретоковый преобразователь включают в параллельный резонансный контур, на который подают импульсы возбуждающего тока. Амплитуду выходного сигнала вихретокового преобразователя сравнивают с пороговым уровнем, а полученный сигнал разбаланса усиливают и используют для регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока, а также применяют в качестве первого информативного параметра при расчете толщины контролируемого покрытия. Частоту импульсов возбуждающего тока в цикле измерения сначала линейно увеличивают в рабочем диапазоне контроля до момента изменения знака разности фаз между возбуждающим током и выходным сигналом вихретокового преобразователя. Затем медленно уменьшают частоту возбуждающего тока до момента появления начального знака разности фаз, после чего измеряют частоту и используют ее в качестве второго параметра при оценке толщины покрытия. Структурная схема прибора с амплитудно-частотным способом контроля приведена на рис. 2.

Усиленная ОУ разностное напряжение используется для регулировки амплитуды импульсов тока в ПНТ и поступает на блок обработки информации БОИ, который подключен к управляющим входам интегратора ИН и коммутатора напряжений КН. Результаты контроля выводятся на блок индикации БИ.

Для расширения диапазона контроля толщины покрытия использован принцип развертки частоты импульсов возбуждающего сигнала, реализуемый с помощью интегратора ИН и генератора УГИ.

В начале цикла контроля блок обработки БОИ устанавливает в исходные состояния коммутатор КН и интегратор ИН. При этом на вход интегратора ИН через коммутатор КН подается опорное постоянное напряжение ( $U_{O1} \geq 2$  В), поэтому напряжение на выходе интегратора начинает линейно увеличиваться  $U_{ИН} = U_{O1}/T$  со скоростью нарастания  $V_{ИН} = U_{O1}/T$ , зависящей от постоянной времени  $T$  интегратора ИН.

Напряжение  $U_{ИН}$  поступает на управляющий вход генератора УГИ, формирующего прямоугольные импульсы со скважностью, равной двум ( $Q=2$ ). Частота импульсов  $f_B$  на выходе генератора УГИ линейно повышается во времени относительно начального значения  $f_{B,нач}$ , причем скорость нарастания частоты возбуждающих колебаний пропорциональна коэффициенту преобразования  $K_{УГИ}$  генератора УГИ и значению  $U_{O1}$  опорного напряжения:

$$f_B = f_{B,нач} + K_{УГИ} U_{O1} / T. \quad (3)$$

Импульсы от генератора УГИ через преобразователь напряжения в ток ПНТ с большим выходным сопротивлением ( $R_{ПНТ} \rightarrow \infty$ ) поступают на возбуждающую обмотку вихретокового преобразователя ВП.

При подключении возбуждающей обмотки ВП с индуктивностью  $L_{ВП}$  параллельно конденсатору  $C$  образуется параллельный контур, имеющий резонансную частоту  $f_p = 1/2\pi \sqrt{L_{ВП}C}$ . При большой добротности  $L_{ВП}C$ -контур ( $Q > 10$ ) его выходное напряжение имеет гармоническую форму даже в случае подачи на контур прямоугольных импульсов возбуждающего тока, а частота выходного сигнала изменяется в соответствии с частотой  $f_B$  импульсов возбуждающего тока.

При первичной настройке устройства или перед началом цикла допускового контроля преобразователь ВП размещают на образцовом изделии с эталонной толщиной немагнитного покрытия, и регулировкой переменного конденсатора устанавливают частоту резонанса  $L_{ВП}C$ -контур примерно равной средней частоте рабочего диапазона контроля  $f_p \approx f_{ср}$ . Этим обеспечивается высокая чувствительность контроля и наибольшая круговая фазочастотная характеристики, которая определяется типовыми свойствами резонансного контура. Амплитудным детектором АД и усилителем ОУ выделяется и усиливается сигнал разбаланса  $U_{ОУ} = K_{ОУ}(U_{ПОР} - U_{М1})$  между пороговым значением ( $U_{ПОР} \geq 2,5$  В), формируемым источником напряжений ИОН, и амплитудой  $U_{М1}$  выходного сигнала преобразователя ВП. Напряжение

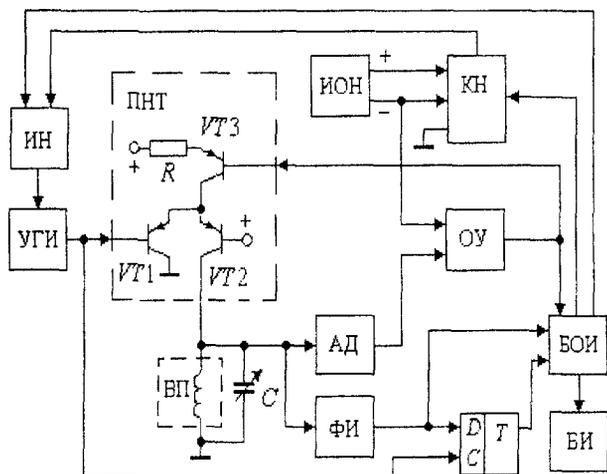


Рис. 2. Структурная схема прибора с амплитудно-частотным способом контроля

Устройство содержит управляемый генератор импульсов УГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ и параллельный контур на вихретоковом преобразователе ВП с конденсатором  $C$ , к которому подключены амплитудный детектор АД и формирователь прямоугольных импульсов ФИ. Выход формирователя импульсов ФИ подключен к С-входу триггера Т, на D-вход которого поступают импульсы от управляемого генератора УГИ. Операционный усилитель ОУ служит для сравнения выходного сигнала детектора АД с пороговым уровнем, формируе-

$U_{Oy}$  служит для регулировки амплитуды импульсов возбуждающего тока на выходе ПНТ.

Гармонический выходной сигнал вихретокового преобразователя ВП преобразуется формирователем ФИ в последовательность прямоугольных импульсов. Эти импульсы сравниваются по фазе с импульсами генератора УГИ с помощью D-триггера, выполняющего функцию фазового компаратора. Если частота  $f_B$  импульсов УГИ не превышает резонансной частоты контура ( $f_B < f_p$ ), то разность фаз между входными и выходными сигналами  $L_{ВПС}$ -контура будет положительной:  $\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_1 > 0$ . При равенстве этих частот ( $f_B = f_p$ ) фазовый угол  $\Delta\varphi$  переходит через нулевое значение ( $\Delta\varphi = 0$ ), а при дальнейшем повышении частоты ( $f_B > f_p$ ) – становится отрицательным ( $\Delta\varphi < 0$ ). При нарастании частоты импульсов D-триггер срабатывает и переходит из единичного логического состояния в нулевое (переход «1→0») УГИ, в момент равенства частот  $f_1 \approx f_p$ . При срабатывании D-триггера блок обработки БОИ переключает коммутатор КН, и на интегратор ИН подается небольшое отрицательное напряжение  $U_{O2} \approx -U_{O1}/100$  от ИОН. Выходное напряжение интегратора ИНТ начинает медленно уменьшаться, что приводит к аналогичному относительно медленному понижению частоты  $f_B$  импульсов УГИ. Данный процесс продолжается до момента возврата D-триггера в исходное состояние (переход «0→1»). После срабатывания D-триггера блок обработки БОИ дает команду на коммутатор КН, подключая вход интегратора ИНТ к нулевой цепи. Интегратор переходит в режим запоминания, его выходное напряжение не изменяется, поэтому частота  $f_B$  выходных импульсов УГИ также остается постоянной и соответствует резонансной частоте  $f_B \approx f_p$ .

Блоком обработки БОИ частота  $f_B$  измеряется на интервале времени  $T_{ИЗМ} = n/f_C$ , кратном периоду сетевой частоты  $T_C = 1/f_C = 20$  мс (при  $n = 1, 2, \dots, 10$ ). Одновременно в БОИ кодируется напряжение  $U_{OY}$ , поступающее с выхода усилителя ОУ. После окончания такта измерения частоты  $T_{ИЗМ}$  блок обработки БОИ устанавливает интегратор ИНТ в нулевое состояние, чем завершает цикл двухтактного контроля.

По результатам измерений частоты,  $N_f = T_{ИЗМ} f_B$  и напряжения  $NU = K_{БОИ} U_{OY}$  в блоке обработки БОИ выделяется информативный параметр, т. е. вычисляется толщина  $H$  покрытия по типовому алгоритму:

$$H = K_1 (n U_{OY} + K_2 / f_p), \quad (4)$$

где  $K_1, K_2$  – коэффициенты, определяемые экспериментально для конкретных типов покрытий.

Повышение чувствительности контроля достигается при увеличении добротности контура ( $Q > 20$ ) в случае применения детектора АД и формирователя ФИ с высокими входными сопротивлениями. Малые изменения толщины покрытия ( $\Delta H \approx 0,2 \dots 1,5$  мкм) приводят к резкому отклонению резонансной частоты (до десятков килогерц) относительно номинального значения ( $f_p \approx 10 \dots 25$  МГц).

Двухтактное изменение направления и скорости развертки частоты возбуждающих импульсов позволяет устранить эффект «сноса» частоты  $f_p$ , характерный для резонансных систем при линейной развертке частоты сигнала [5]. Например, если  $L_{ВПС}$ -контур имеет резонансную частоту  $f_p = 10$  МГц и добротность  $Q = 100$ , то его постоянная времени составляет  $T_K = Q/\pi f_p \approx 3$  мкс. При развертке частоты возбуждающих колебаний со скоростью  $V_f = 1$  кГц/мкс нулевая разность фаз  $\Delta\varphi = 0$  между возбуждающим и выходными сигналами будет на частоте  $f_B \approx f_p + T_K V_f \approx (107 + 3 \cdot 104)$  Гц, что дает погрешность  $\Delta f_p \approx 30$  кГц. Если выполнять развертку частоты импульсов в диапазоне (5 – 15) МГц со скоростью  $V_{f1} = 1$  кГц/мкс, то длительность первого такта (до момента появления частоты  $f_B \approx 10,03$  МГц) составит  $T_{ИЗМ1} \approx 0,5$  мс. При 100-кратном понижении скорости развертки во втором такте (до  $V_{f2} = 10$  Гц/мкс) его длительность составит  $T_{ИЗМ2} = \Delta f_p V_{f2} = 0,3$  мс, а погрешность от «сноса» частоты уменьшается до уровня  $\Delta f_p \approx 300$  Гц.

#### Литература:

- 1 А. с. № 1619007 СССР. Устройство для двухпараметрового неразрушающего контроля изделий / Е.Т. Беликов, Л.К. Тимаков. – Оpubл. 1991, Бюл. № 1.
- 2 А. с. № 1608422 СССР. Вихретоковый способ двухпараметрического контроля изделий / Е.Г. Беликов, Л.К. Тимаков Л. К. – Оpubл. 1980, Бюл. № 43.
- 3 А. с. № 1627822 СССР. Способ вихретокового контроля толщины электропроводящего покрытия и устройство его осуществления / Л.Я. Новиков, В.Ф. Бобров. – Оpubл. 1991, Бюл. № 6.
- 4 Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995.
- 5 Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1971. – С. 265-269.

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК 577.352.5:58]:001.891.53

Канд. техн. наук, доц. Бондарева Л.А., асп. Жучков А.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, (4862)419876; E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТЕНИЙ

*In article the block diagram of the device is submitted, allowing to carry out the control and diagnostics of a functional condition of various plants over measurement of their bioelectric potential, to carry out the long monitoring bio potential directed on studying of influence of various external factors on the measured parameter and, hence, on a condition of researched plants. Techniques and results of the experimental researches which have been carried out on experimental installation are resulted.*

Повышение эффективности процесса выращивания различных растений и сокращение расходуемых при этом ресурсов возможно только в случае увеличения точности регулирования параметров среды, в которой находится растение, причем с учетом потребностей самого растения. Это связано с тем, что неотъемлемым свойством любой живой системы является ее способность реагировать на изменения в среде полезными для себя действиями [1]. Это свойство является одним из отличительных признаков живой материи от неживой, так как живой организм всегда стремится приспособиться к внешним условиям, чтобы более эффективно использовать ресурсы среды или свои собственные.

Уже достаточно давно известно, что большая часть физиологических процессов, происходящих в растениях, связана с электрическими явлениями. Благодаря различиям в функциональной активности тканей и органов, возникают биоэлектрические потенциалы (БЭП), которые являются основным средством управления физиологическими процессами и передают информацию посредством генерации на мембранах градиентов электричества [2], представляющих собой напряжение милливольтового диапазона. Физиологическое значение данного явления в настоящее время интенсивно изучается.

БЭП наиболее емко характеризуют физиолого-биохимическую активность растений, интенсивность движения воды, минеральных элементов. Они тесно связаны с процессами обмена веществ и достоверно отображают общее состояние растения. При изменении внешних условий изменяются именно БЭП, которые в свою очередь вызывают изменение других процессов, протекающих в растении. БЭП следует рассматривать как интегральный показатель всех физиологических, биохимических и биофизических процессов, протекающих в живых тканях. Поэтому они могут выступать объективным критерием состояния исследуемого растения. Более жизнеспособ-

ными следует считать растения, у которых разность потенциалов (с учетом полярности) выше.

Изменение БЭП под влиянием тех или иных факторов происходит намного быстрее, чем изменение внешних морфометрических признаков растений. Поэтому по данному параметру можно более объективно судить о состоянии растения и регулировать внешние параметры с целью поиска оптимальных.

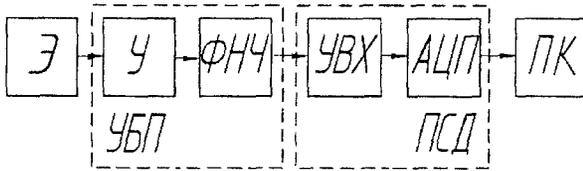
Вследствие этого электрофизиологический метод позволяет быстро получать интегральную информацию о структурных, физико-химических и функциональных особенностях растения, не нанося ему вреда, что дает возможность применять его в качестве средства функциональной диагностики растений [3].

Целью проведенной работы являлось создание комплекса, обрабатывающего сигнал биопотенциала растений, на базе персонального компьютера (ПК) и обеспечение проведения длительного мониторинга за функциональным состоянием растения.

Создание устройства для детального исследования БЭП растений, их распределения по поверхности, а также изменений, происходящих в результате воздействия различных внешних факторов, основано на обязательном выполнении целой группы противоречивых требований и сопряжено со схемотехническими трудностями. С одной стороны, растение – это живой организм, и основная задача исследователя – не навредить ему. В этой связи к средствам измерения БЭП предъявляются высокие требования в отношении влияния на объект измерения. В частности, они должны иметь максимально возможное входное сопротивление и минимальные входные токи для исключения шунтирования объекта входными цепями прибора. С другой стороны, следует учитывать особенности растения, как источника информативного сигнала: малая амплитуда сигнала (сотни мВ), высокое внутреннее сопротивление (десятки МОм), сильное влияние помех. Исходя из этого, можно сформировать требования к экспериментальной ус-

тановке: высокая чувствительность, большое входное сопротивление, малые входные токи, высокая помехоустойчивость, отсутствие влияния на объект.

С учетом указанных особенностей создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.



Э – электроды, У – усилитель, ФНЧ – фильтр нижних частот, УБП – усилитель БЭП, УВХ – устройство выборки хранения, ПСД – плата сбора данных

**Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для измерения БЭП растений**

В данном устройстве БЭП, снимаемый с растения при помощи электродов Э и усиливается усилителем У, фильтруется и подается через УВХ на вход АЦП. Для обеспечения более высокой помехоустойчивости системы усилитель и фильтр конструктивно выполнены в виде отдельного блока (усилителя БЭП) и устанавливаются в непосредственной близости от растения, а УВХ и АЦП установлены на плате сбора данных, которая включается в шину ПК. Результаты измерений записываются в файл.

Первым блоком в схеме измерительного устройства является усилитель БЭП, позволяющий увеличить амплитуду информативного сигнала. Это сделало дальнейшую обработку сигнала более удобной и позволило повысить помехоустойчивость.

Применение ФНЧ в схеме устройства объясняется наличием высокочастотных помех и сетевых наводок на выходе усилителя БЭП. Наличие в спектре информативного сигнала инфранизких частот позволило сузить полосу пропускания ФНЧ до 0,5 Гц.

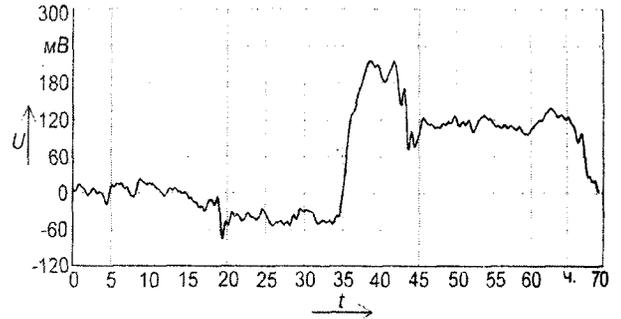
В дальнейшем сигнал поступает на многофункциональную плату аналого-цифрового ввода/вывода ЛА-70М4, предназначенную для непрерывного сбора экспериментальных данных и записи их в ПЗУ ПК.

Объектом экспериментальных исследований служило растение «Каллизия душистая» (лекарственное растение, более известное под народным названием «Золотой ус»). Для исследования функциональной роли БЭП в растении было поставлено два опыта.

Первый опыт проводился с целью исследования взаимосвязи значения БЭП и влагообеспеченности растения по следующей методике:

- к объекту при помощи электродов подключалась экспериментальная установка для снятия БЭП;
- растение (объект) не поливалось в течение времени, превышающего в 2 – 3 раза обычные сроки его полива (35...37 часов);
- по прошествии этого времени производился обильный полив растения;
- после однократного обильного полива растение не поливалось до окончания эксперимента.

График изменения БЭП объекта исследования (растения) во времени показан на рис. 2.



**Рис. 2. График экспериментальных данных при исследовании взаимосвязи значения БЭП и влагообеспеченности растения**

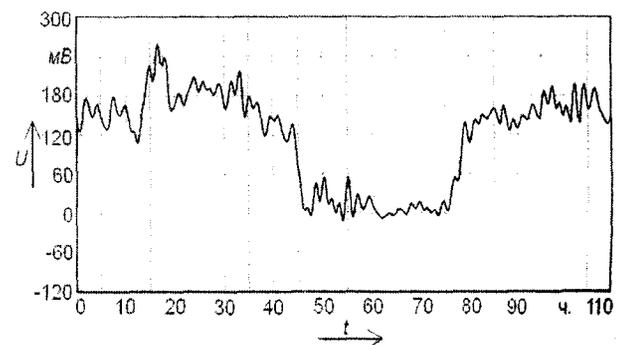
Из графика ясно видно, что при недостатке влаги (первые 35 ч.) значение БЭП уменьшается и постепенно из области положительного потенциала устойчиво смещается в область его отрицательных значений. В подобном состоянии растение находится до тех пор, пока не получит порцию влаги. После полива происходит смена полярности БЭП и его величина резко возрастает, что говорит об активном потреблении влаги. Резкий скачок БЭП можно объяснить активным потреблением влаги из почвы, целью которого является пополнение внутренних ресурсов растения. Когда же запас влаги сделан, растение переходит в режим использования влаги из почвы, который продолжается до ее высыхания. Со временем снова сказывается недостаток влаги, и потенциал опять стремится к области нулевых значений.

Второй опыт проводился с целью исследования взаимосвязи БЭП и светообеспеченности по методике:

- к растению электродами подключалась экспериментальная установка для снятия БЭП;
- полностью блокировался доступ света к растению в течение 75 ч;
- по окончании 75 ч растение активно освещалось естественным и искусственным освещением.

Важным условием данного опыта являлся стабильный полив, то есть влияние данного фактора на результаты исследования исключено.

Результаты эксперимента показаны на рис. 3.



**Рис. 3. График экспериментальных данных при исследовании взаимосвязи БЭП и светообеспеченности растения**

Данный график (рис. 3) показывает, что при отсутствии света значение БЭП уменьшается, но не так существенно, как в первом опыте. Длительное затемнение приводит к снижению БЭП до нулевых значений, где он находится продолжительное время. После подачи света БЭП возрастает и при достаточной освещенности растения поддерживается на определенном уровне в положительной полуплоскости.

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод о том, что БЭП растения изменяется при изменении факторов внешней среды и может характеризовать функциональное состояние объекта. Положительный потенциал соответствует оптимальным для растения внешним условиям, а отрицательный (или нулевой) говорит о его угнетенном состоянии. Исходя из этого, можно предположить, что значение БЭП характеризует активность протекания жизненных процессов в растении. Общеизвестно, что для нормальной жизнедеятельности большинству растений необходимы, как минимум, два компонента: свет и влага. При наличии всех необходимых компонентов в растении протекают определенные процессы (в частности фотосинтез) и БЭП поддерживается на некотором достаточно стабильном уровне. При недостатке какого-либо компонента происходит затормаживание процессов жизнедеятельности, падение

значения БЭП и смена его полярности. При этом полученные результаты позволяют говорить о более негативном влиянии на состояние растения именно недостаточной влагообеспеченности, которая в более короткие промежутки времени приводит растение в угнетенное состояние.

Полученные результаты подтвердили правомерность применения разработанного устройства для контроля и диагностирования функционального состояния растений по электрофизиологическим параметрам, а также доказали возможность проведения с его помощью длительного мониторинга БЭП объекта и изучения влияния условий произрастания растения на его функциональное состояние.

#### Литература:

1 *Электрофизиологические методы в изучении функционального состояния растений: Сб. статей [Текст] / под ред. А. И. Пупониной; Московская с.-х. академия им. К. А. Тимирязева. – М., 1988. – 283 с.*

2 *Физиология и биохимия культурных растений [Текст] / под ред. В. И. Цветковой; Горьков с.-х. институт. – Горький, 1985. – 114 с.*

3 *Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений [Текст] / под ред. В. М. Третьякова. – М.: Колос, 2000. – 640 с.*

УДК. 616.073

*Канд. техн. наук, доц. Егоров Б.А., асп. Яковенко М.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)*

## ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИОУПРАВЛЯЕМЫХ АППАРАТОВ ТОКОВОЙ ТЕРАПИИ

*The article contains information about new completed scheme construction physiotherapeutic bio controlling devices for electro treatment. Also article includes algorithm's structure bio control determine problems which are connected with algorithm's realization in program code on AVR Assembler and ways of decision determining problems. Also was executed algorithm's analyzed of point of view of minimization requirements to equipment executing algorithm.*

Результаты проведенных на кафедре «ПМиС» исследований изменения ударного объема сердца от действия тока лечебного диапазона поставили вопрос о возможности практического создания биоуправляемой физиотерапевтической аппаратуры [1]. Такая аппаратура позволит индивидуализировать лечебное воздействие на пациентов, этим повысив его эффективность, значительно снизить риск нежелательных сопутствующих явлений и последствий, а возможно, и расширить круг пациентов, которым целесообразно назначение электролечения. В работах [2, 3] предложена полученная по результатам экспериментальных исследований математическая модель, описывающая

с использованием известной формулы Старра взаимосвязь между изменениями артериального давления и ударного объема. Это создает предпосылки для разработки биоуправляемой аппаратуры, т.к. автоматическое измерение артериального давления, в том числе в непрерывном режиме, в настоящее время не представляет трудностей, а применяемые датчики с электрическим выходом имеют необходимые характеристики и выпускаются в массовом количестве.

Таким образом, алгоритм работы биоуправляемого физиотерапевтического аппарата, например токовой амплипульсотерапии следующий. Априорно зная параметры исходного артериального давления паци-

ента и режим тока (он задается врачом исходя из медицинских рекомендаций), до начала процедуры производится автоматический расчет значений ударного объема для всего диапазона, рекомендованного к воздействию тока. Полученные значения считаются исходными (контрольными) для данного пациента и записываются в блок управления аппаратом. Процесс воздействия током начинается с нуля и далее величина тока возрастает до того момента, пока не достигнет заданного врачом значения, если величина измеряемого во время процедуры ударного объема не превысит до этого рассчитанного значения. В таком случае продолжение процедуры может быть прекращено или продолжено при более низких величинах тока при одновременном контроле ударного объема.

Для разработки биоуправляемого физиотерапевтического аппарата предстоит решить технические вопросы, связанные с выбором конкретного типа датчика, программированием управляющего блока для работы его в требуемом режиме и включения их в общую схему применяемых и хорошо зарекомендовавших себя по медицинским показателям аппаратов. Однако анализ применяемых в настоящее время токовых физиотерапевтических аппаратов показал, что даже последние разработки 2000-2004 гг., как например аппарат «Амплипульс 7», строятся по «классической» для подобных систем схеме, состоящей из генераторов несущей и модулирующих частот, модулятора, усилительного каскада и блока управления, в лучшем случае, цифрового. Очевидно, что все используемые блоки могут быть выделены как независимые.

Анализ элементной базы цифровой электроники показал, что для проектирования современного физиотерапевтического аппарата токовой терапии, автоматическое управление которым основано на принятой математической модели, целесообразно использовать микроконтроллер. В аппарате он предназначен для математических функциональных и логических преобразований, выработки на основе полученных значений управляющего сигнала, а также для генерации воздействующего на организм сигнала. Это схемотехническое решение позволит исключить генераторы, модулятор и усилитель в самостоятельном исполнении, совместив их в одном блоке.

В настоящее время существует более десятка различных типов микроконтроллеров, отличающихся форматами ввода/вывода, разрядностью, производительностью. По результатам их обзора выдвинуто предложение о разработке универсальной схемы автоматического биоуправляемого электрофизиотерапевтического аппарата. Предложенный вариант схемы представлен на рис. 1. На схеме обозначены:

- 1 – устройство индикации;
- 2 – устройство ручного управления;
- 3 – устройство математическое управляющее;
- 4 – ШИМ-генератор;
- 5 и 6 – контуры обратной связи 1 и n;
- 7 – преобразователь ШИМ-АМ;
- 8 – цепь пациента.

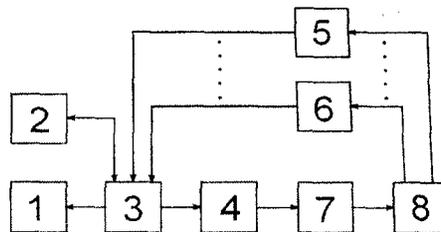


Рис. 1. Структурная схема биоуправляемого физиотерапевтического аппарата токовой терапии

В предложенной схеме физиотерапевтического аппарата микроконтроллер использован не только для управления воздействующим током, но и для его генерирования. Выработка требуемого амплитудно-модулированного синусоидального тока производится на основании преобразования широтно-импульсно модулированного сигнала. Особенностью этого способа является отсутствие потребности в генераторе и модуляторе, так как ШИМ сигнал вырабатывается непосредственно контроллером в требуемом виде.

Особенностью схемы рис. 1 является наличие нескольких входных каналов: аналогового и цифровых, позволяющих организовать несколько ветвей обратной связи, что позволяет использовать подобную структуру для разработки электрических принципиальных схем под конкретные задачи. Это означает возможность варьирования числа ветвей обратной связи, то есть числа параметров организма, на основании которых ведётся управление выходным током. Очевидно, что число ветвей определяется поставленной задачей разработки, а их максимально возможное число – вычислительной мощностью микроконтроллера и числом интегрированных на его кристалле аналоговых и цифровых входов/выходов.

Основной задачей построения по предложенной схеме работоспособного аппарата является выбор микроконтроллера. Предъявляемые к нему требования определяются поставленной задачей. При выборе имеет значение число контролируемых параметров при процедуре. Для увеличения количества цепей обратной связи при разработке устройства физиотерапевтического достаточно выбрать микроконтроллер большей разрядности, большей частоты или с расширенным набором инструкций.

При наличии большого числа аналоговых входов (8) и портов ввода/вывода (8), как например, у микросхемы ATmega64, именно производительностью микроконтроллера определяется непрерывность генерации тока. Это неудобно, т.к. непременно приводит к увеличению стоимости прибора. Поэтому для обеспечения работы схемы и минимизации требований к быстродействию микроконтроллера был разработан специальный алгоритм управления, позволяющий непрерывно генерировать терапевтический ток и вести расчет параметров управления даже с использованием относительно низко производительных микроконтроллерах. Таким образом, с использованием разработанного алгоритма минимальные требова-

ния к микроконтроллеру следующие: разрядность – 8, тактовая частота – 4 МГц, количество параллельных портов ввода/вывода – 3. Обязательно наличие трёх интегрированных на кристалле таймеров/счетчиков, необходимая разрядность одного счетчика – не менее 10. Этим условиям полностью удовлетворяют большинство выпускаемых промышленностью моделей микроконтроллеров, среди которых наиболее близка микросхема ATmega16. Отметим, что при повышении тактовой частоты процессора микроконтроллера, достаточно будет всего двух таймеров. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

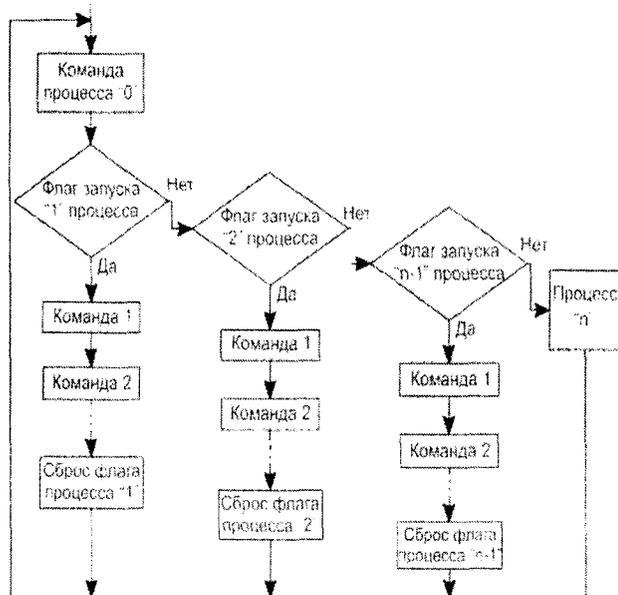


Рис. 2. Алгоритм биоуправления физиотерапевтическим аппаратом токовой терапии

Основными принципами представленного алгоритма является принцип строгой временной дискретности (вертикальная линия) и принцип жесткой приоритетности (горизонтальная линия).

Принцип приоритетности (иерархичности) заключается в том, что в алгоритме автоматического управления физиотерапевтическим аппаратом все существующие задачи, решаемые центральным процессорным устройством, имеют свои жесткие приоритеты, распределённые в блок-схеме слева направо по убыванию от высшего «0» до низшего «n». Процесс с приоритетом «1» выделен для особой роли. Примером процессов может являться расчет ударного объема, расчет тока в цепи пациента, расчет поправочного коэффициента регистра сравнения ШИМ-генератора, опрос АЦП, запуск АЦП. Необходимость каждого процесса обозначается флагом необходимости процесса. При этом ни одна команда, находящаяся правее в блок-схеме, то есть имеющая более низкий приоритет, не будет исполнена, пока команда, находящаяся левее и имеющая более высокий приоритет, не выполнится полностью и не снимет свой флаг. Выставление флагов необходимости процесса происходит независимо от центрального процессора, то

есть параллельно с основной программой. Цикличность исполнения программы определяется процессом высшего приоритета, которая задаётся независимым таймером/счетчиком. Так, например, в биоуправляемом аппарате для амплипульсотерапии этим процессом является загрузка регистра сравнения ШИМ-генератора с частотой 5 кГц, определяемой требуемым выходным током. Прерывания при этом специально запрещены, и опрос флагов необходимости процессов проходит последовательно циклически на основании принципа временной дискретности.

Принцип временной дискретности заключается в том, что исполнение команд одной вертикальной ветви происходит за период процесса высшего приоритета. Для физиотерапевтического аппарата амплипульсотерапии изменение параметров воздействующего на организм человека тока, то есть исполнение одной из вертикальных ветвей, происходит за длительность полупериода выходной частоты 5 кГц. Вычисления и выработка управляющего воздействия происходят за 0,2 мс, причём паузы в воздействии даже на это время не происходит. Если время выполнения команд в ветви меньше, чем время до следующего исполнения процесса высшего приоритета, текущая ветвь дополняется пустыми операциями.

Одной из вертикальных ветвей алгоритма является последовательность действий, направленная на вычисление величины ударного объема через имеющиеся значения систолического и диастолического давления. Математическая зависимость, используемая для этого преобразования, имеет вид:

$$UO = (100 + 0,6 \cdot a \cdot b \cdot 0,03 - 0,57 \cdot c) \cdot \left(\frac{i}{10} + 1,2\right), \quad (1)$$

где  $a$  – пульсовое давление, мм. рт. ст;

$b$  – приращение систолического давления;

$c$  – диастолическое давление;

$i$  – коэффициент тока.

Решение вопроса об оптимизации алгоритма управления аппаратом электрофизиотерапевтическим для амплипульсотерапии привело к рассмотрению системы команд современных микроконтроллеров. Выяснилось, что микроконтроллеры, удовлетворяющие заявленным минимальным требованиям быстрой работы и количества портов ввода/вывода, обладают таким набором инструкций или макрокоманд, в котором не содержится команды деления. Кроме того, наиболее широко распространённые микроконтроллеры не предназначены для выполнения операций с плавающей точкой, поэтому для выполнения операций с дробными числами потребуется использование вдвое большего числа регистров для хранения целой и дробной части операндов и, соответственно, вдвое большего числа операций пересылки данных между ними. В настоящее время существуют алгоритмы, позволяющие реализовать программный код процедуры деления через операции вычитания и регистрового сдвига. Эти процедуры требуют для исполнения много времени, а оно зависит от величин

ны частного деления, влияющего на количество циклов вычитания делителя из делимого. Для выполнения операций с плавающей точкой применяют также алгоритмы, удлиняющие программный код и время его исполнения, как минимум, в три раза.

Очевидно, алгоритм расчета по формуле (1) в представленной форме будет содержать минимум шесть операций с плавающей точкой и процедуру деления. Использование такого длительного аппаратного расчета вызывает повышение требований к быстродействию из-за превышения времени расчета сверх доступных 0,2 мс. Предлагается преобразовать эту формулу так, чтобы все числа и результаты последовательных математических операций в ней являлись целыми, и сводились к минимуму времени исполнения операции деления, чтобы частное от каждого деления было как можно меньше.

Преобразованная в соответствии с представленным требованиям формула (1) примет вид:

$$UO = (100 - \frac{30 \cdot c - |a \cdot b|}{50}) \cdot \frac{i + 10}{10} \quad (2)$$

Формула (2) не содержит дробных чисел, то есть не требует для своего вычисления операций с плавающей точкой и использования дополнительных регистров. Процедуры деления оптимизированы по критерию минимума времени. Отладка алгоритма на эмуляторе AVRStudio4 фирмы Atmel при рекомендуемой частоте процессора 4 МГц показала, что время исполнения программного кода менее заявленного 0,2 мс, то есть код удовлетворяет условиям.

Математические преобразования формулы (1) приводят к изменению точности расчета. Для оценки погрешности выражения (2) построены графики зависимости ударного объема сердца пациента от силы терапевтического тока, представленные на рис. 3.

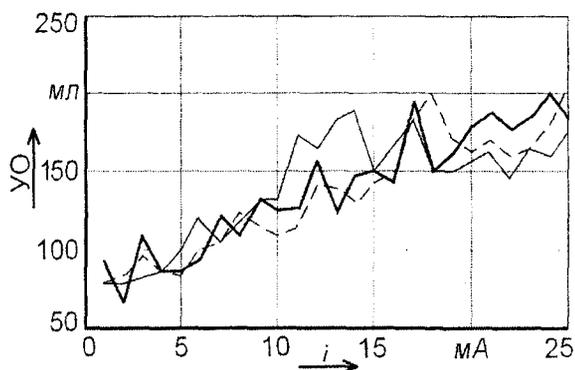


Рис. 3. Графики зависимости ударного объема сердца пациента от силы терапевтического тока

Толстой линией на графике показан ударный объем сердца, измеренный эхотомоскопом и считающийся образцовым. Тонкой и штриховой линиями обозначены значения ударного объема, полученные косвенным методом через артериальное давление с применением формул (1) и (2) соответственно.

Были определены предельные отклонения результатов косвенного измерения ударного объема. Их отклонение от образцового значения лежит в диапазоне 10 %. Можно утверждать, что приведение формулы (1) к форме записи в виде выражения (2) не изменили предельных отклонений результатов, и точность расчета осталась неизменной.

Если вычисления в одной из вертикальных ветвей не укладываются в заданное время, данные процесса записываются во временную область памяти, с выставлением флага необходимости процесса с приоритетом «1». После исполнения команды высшего приоритета программа переходит к прерванному процессу с первым приоритетом, заканчивая вычисления.

При разработке программы биоуправляемого физиотерапевтического аппарата для микроконтроллера является необходимым построение циклограммы, которая показывает расчетное время исполнения инструкций в ветвях и позволяет выявить недостаточность времени для обработки этих ветвей.

Если складывается такая ситуация, что времени, отведенного на каждую ветвь, например 0,2 мс, при циклической частоте процесса высшего приоритета 5 кГц, недостаточно, остается возможность повышения тактовой частоты кристалла микроконтроллера. При этом количество тактов процессора за период процесса высшего приоритета увеличится и инструкции, записанные в каждой ветви, выполнятся быстрее, поэтому отведенного времени будет достаточно.

Функционирование представленного алгоритма возможно только при непосредственном вводе данных, представленных в аналоговой форме, по каналам обратной связи от датчика в микроконтроллер с использованием интегрированного на кристалле аналого-цифрового преобразователя. Это позволит более точно задать временные характеристики алгоритма и исключить сбои в работе программы, вызванные нестабильностью и инерционностью внешних по отношению к микроконтроллеру цепей, таких как усилители или фильтры. При положительном решении указанных проблем создание физиотерапевтического биоуправляемого аппарата токовой терапии возможно в самом ближайшем будущем.

#### Литература:

- 1 Егоров Б.А., Яковенко М.В., Евзельман М.А., Санников Д.П. Предпосылки разработки биоуправляемой физиотерапевтической аппаратуры. Проведение восстановительного лечения. Сб.тр. №5-Воронеж: Изд. Воронежск. гос. мед. академии.-2004.
- 2 Егоров Б.А., Яковенко М.В. Использование измерения ударного объема сердца человека для биоуправления физиоаппаратами. – Курск: КГТУ. – 2004.
- 3 Егоров Б.А., Бодров М.А. Особенности аналитического описания изменения ударного объема сердца человека под влиянием внешней нагрузки. Известия ОрелГТУ, Орел: ОрелГТУ, 2005.

УДК: 612.014.462.9

Канд. биол. наук Бобров А.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (0862)419876; E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

## МОДЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОГО МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ АКТИВИРОВАННОЙ ВОДЫ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

*In a model investigation being carried out with the aim of definition a mechanism of activated water influence upon vital functions of living organism, as a system model of membrane neighboring double electric layers (DEL) of a biological membrane there was used a system of electrode neighboring DEL, so-called "current electrode system", having a source of electromotive force (EMF). In the area of experiments along with changes of inter-electrode current arising as a result of a field affect of non-activated and activated water there were registered parameter changes of self-oscillating (SO) process excited in an electrode system. There is registered a sharp increase of efficiency in a field effect of the water own torsion field on physical-chemical processes proceeding in electrode system as a result of water activation.*

Все объекты живой и неживой природы индуцируют в физическом вакууме собственные характеристические торсионные поля (ТП), несущие сложную информацию о структуре их спиновых систем [1]. При пропускании торсионного излучения через вещество – т.н. информационную матрицу, это излучение в результате взаимодействия с характеристическим информационным полем матрицы приобретает информацию о структуре ее спиновой системы. Воздействие излучения, несущего информацию, на объекты природы называется «информационным».

В последнее десятилетие с нарастающими темпами происходило внедрение информационных методов воздействия на биологические объекты в медицину и в различные технологии, связанные с производством с/х продукции и продуктов питания.

Одним из наиболее перспективных является метод опосредованного информационного воздействия с применением активированной воды. Вода, подвергнутая информационному воздействию, – так называемая активированная вода – влияет на всхожесть семян фасоли, развитие растений и жизнедеятельность теплокровных [2, 3]. Биологическая активность активированной воды в большой степени зависит от таких факторов, как природа информационной матрицы, степени разведения и продолжительности хранения воды в постактивационном периоде [3-6].

В зависимости от параметров, опосредованное информационное воздействие может стимулировать или ингибировать жизнедеятельность биологических объектов. Эксперименты на бройлерах показали, что неразведенная активированная вода может губительно действовать на однодневных бройлеров, а при «терапевтических» дозах (при разведении 1:50-1:60) повышать их иммунитет [7].

Эксперименты на микроорганизмах и растениях подтвердили основные выводы, полученные в экспериментах на бройлерах: при некоторых параметрах активации воды ее применение без разведения может снижать всхожесть и подавлять развитие растений. И наоборот: жизнедеятельность биологических орга-

низмов повышается относительно контроля при 4-5-кратном разведении или при применении неразведенной воды на 4-5 сутки после ее активации [2, 3, 6]. На основании этих результатов высказана гипотеза, согласно которой вода, подвергаемая информационному воздействию (активированная вода), сама становится источником излучения, несущего информацию о веществе информационной матрицы, использованной при ее активации. В работах [2, 3, 6] показано, что жизнедеятельность микроорганизмов, подвергшихся информационному воздействию активированной водой, действительно зависит от природы использованной информационной матрицы.

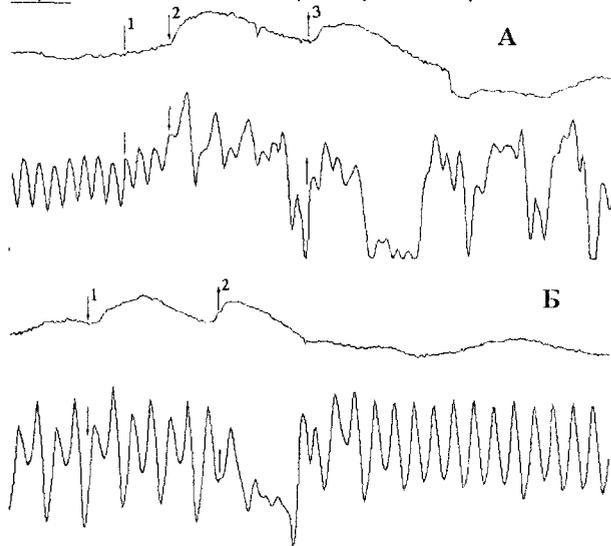
Все вышесказанное свидетельствует о необходимости исследования как основных свойств активированной воды, обуславливающих ее биологическую активность при воздействии на биологические объекты, так и природы самого механизма действия активированной воды на биологические объекты. До настоящего времени отсутствовало четкое представление о том, лежат ли в основе этого механизма чисто химические или физико-химические процессы, или он основан на информационном взаимодействии торсионного поля активированной воды с характеристическими полями всех структурных элементов биологического объекта, начиная с субклеточного уровня.

На первом этапе решение этой проблемы сводилось к изучению характеристического торсионного поля воды. Необходимо было ответить на вопрос: изменяется ли это поле в результате активации воды? Основная трудность при его решении заключалась в необходимости отказа от традиционных методов исследования с применением биологических детекторов торсионного излучения. С целью ее преодоления в качестве преобразователей использовались «токовые датчики» на двойных электрических слоях (ДЭС) в составе компьютеризованного комплекса [8, 9].

Использование преобразователей на ДЭС, возникающих на поверхности раздела двух фаз, обусловлено их уникальными сенсорными свойствами: чувствительность ДЭС к воздействию физических фак-

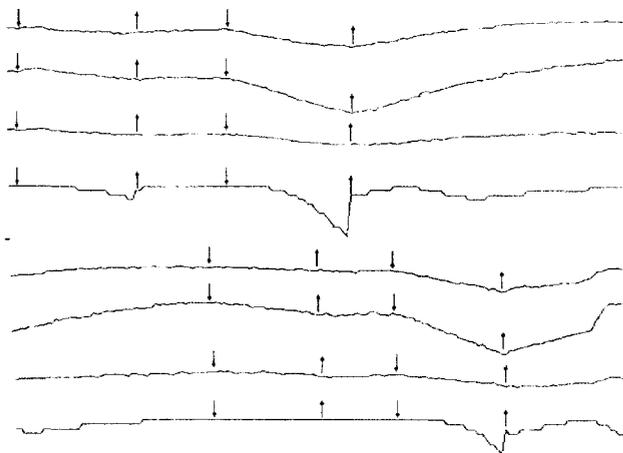


(рис. 2А), а затем неактивированной (рис. 2Б). Как видно на рис.2, как и в предыдущем примере, реакция обоих токовых датчиков на воздействие активированной воды по величине значительно превышает реакцию, вызванную воздействием неактивированной воды. Наиболее наглядно она выражена в изменении параметров АК-процесса.



**Рис. 2. А. Активированная вода: 1–приход экспериментатора в ЭП; 2–вода залита в сосуд; 3–вода из сосуда удалена. Б. Неактивированная вода: 1–вода залита в сосуд; 2–вода удалена**

На рис. 3 приведены результаты эксперимента, в котором на датчики 1-3 дважды производились воздействия в течение 15 мин неактивированной А и В) и активированной (Б и Г) водой. О повторяемости результатов в эксперименте можно судить по корреляционной кривой для датчиков 1 и 2.



1 – приход оператора в экспериментальное помещение; 2 – загрузка в сосуд активированной воды; 3 – слив из сосуда неактивированной воды; 4 – загрузка в сосуд активированной вод; 5 – слив из сосуда активированной воды

**Рис. 3. Синхронная реакция двух токовых датчиков на воздействие собственного характеристического поля неактивированной и активированной воды**

Итак, токовые датчики на ДЭС отвечают реакцией на воздействие образцов воды, находящихся от них на расстоянии 75 см. Реакция возрастает в случае воздействия образцом активированной воды. Такое воздействие, в частности, приводит к резкому изменению параметров автоколебательного процесса.

Результаты экспериментов свидетельствуют в пользу гипотезы об информационной полевой природе механизма воздействия активированной воды на живые организмы.

**Литература:**

- 1 Акимов А.Е. Эвристическое обсуждение проблемы поиска дальнедействий. EGS-концепция. МНТЦ ВЕНТ. – М.: Мир, 1991.
- 2 Бобров А.В. Исследование влияния параметров информационного воздействия с применением квантовых генераторов на жизнедеятельность биологических объектов. Отчет о НИР. Гос. регистр. № 01.20.00 10079. – Орловский государственный технический университет; Орел: 2001, 65 с.
- 3 Бобров А.В. Исследование факторов информационного воздействия квантовых генераторов. Отчет о НИР. Гос. регистр. № 01.2.00 105789, Орловский государственный технический университет. – Орел: 2001 – 85 с.
- 5 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. ОрелГТУ, 2003, С. 378-429.
- 6 Бобров А.В. Исследование факторов, определяющих биологическую активность воды. Препринт №1. – Орел: ОрелГТУ, 2004, 29 с.
- 7 Бобров А.В. Способ безрасходной информационной профилактики бройлеров. Птицеводство № 1. М.: 2000.
- 8 Бобров А.В. Сенсорные свойства двойных электрических слоев в биологии и в технике регистрации слабых и сверхслабых излучений. Препринт № 54 МНТЦ ВЕНТ, М., 1994, С. 1-14
- 9 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. ОрелГТУ, 2003, С. 211-222
- 10 Бобров А.В. Рецепторная функция двойных электрических слоев в сб. Регуляция тканевого гомеостаза. Нетоксическая профилактика и терапия хронических патологий. ГКНТ Груз. ССР, Тбилиси, 1989, С. 131-171.
- 11 Бобров А.В. Моделирование реакции живых систем. Современные проблемы изучения и сохранения биосферы. – С.-Пб: Гидрометеиздат. – 1992, С. 227- 244.
- 12 Бобров А.В. Модельное исследование механизма неспецифической рецепции. ВИНТИ. Деп № 2223-В2001. М.: ВИНТИ. – 2001
- 13 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. ОрелГТУ, 2003, С. 170-210.
- 14 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. Орел: ОрелГТУ, 2003, С. 283-305.
- 15 Бобров А.В. Реакция двойных электрических слоев на воздействие торсионного поля. ВИНТИ. Деп № 1055-В97. – М.: ВИНТИ. – 1997.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Канд. техн. наук, доц. Мишин В.В.

(Орловский государственный технический универс

г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [vm@rbcmail.ru](mailto:vm@rbcmail.ru)

Работа выполнена в соответствии с грантом МК-3824.2005.8

## КОМПЛЕКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СОВМЕСТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ И ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

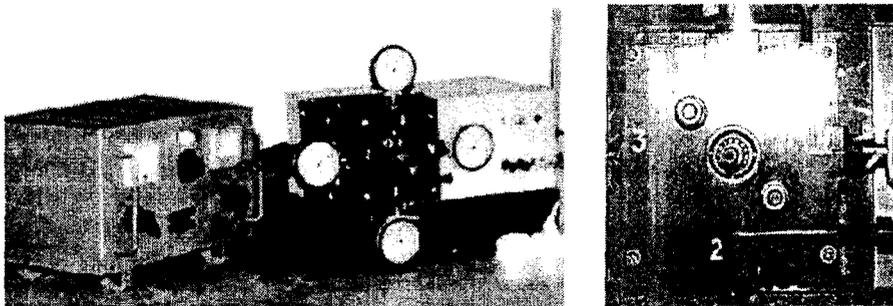
*The complete set of the experimental equipment for realization of electric and joint methods of diagnosing of bearings is offered. The offered complete set of devices and installations contains experimental electromechanical installation, a measuring instrument of diagnostic parameter integrated time micro short circuits (NIT), the calibrator of a measuring instrument of NIT (a pulsator of resistance) and a measuring instrument of electric resistance of the bearing.*

При создании новых методов диагностирования подшипниковых узлов возникает проблема приборного обеспечения экспериментальных исследований. В большинстве случаев можно обойтись рядом серийно выпускаемых приборов и стендов. Например, для реализации виброакустических методов диагностирования имеется целый комплекс сертифицированных испытательных стендов и измерительных приборов. Другая ситуация наблюдается при разработке электрических методов диагностирования. Данная работа направлена на концептуальную разработку комплекта приборов и устройств, реализующих электрические и совместные методы диагностирования подшипников и подшипниковых узлов.

Предлагаемый комплект приборов и устройств содержит экспериментальную электромеханическую

установку, измеритель диагностического параметра нормированное интегральное время микроконтактных (НИВ), калибратор измерителя НИВ (пульсатор сопротивления) и измеритель электрического сопротивления подшипника.

Электромеханическая установка (рис. 1) представляет собой двухопорный узел с подшипниками, например, типа 1000900. Для моделирования различных погрешностей сборки двухопорного подшипникового узла одна опора в установке неподвижно зафиксирована на жесткой основе, другая же сделана подвижной в плоскости, перпендикулярной оси вращения вала. Такая компоновка позволяет изменять взаимное расположение двух подшипников, что необходимо для моделирования отклонения от соосности посадочных мест в узле.



**Рис. 1. Экспериментальная электромеханическая установка**

Исследуемый подшипник 9 (рис. 2) является одной из опор двухопорного узла. Второй опорой вала 1 является подшипник 5. Подшипник 6 предназначен для передачи усилия с устройства радиального нагружения 7. Усилие создается пружиной и регулируется с помощью винтовой пары. Кроме того, имеется устройство циркуляционного нагружения в виде регулируемого дисбаланса 13.

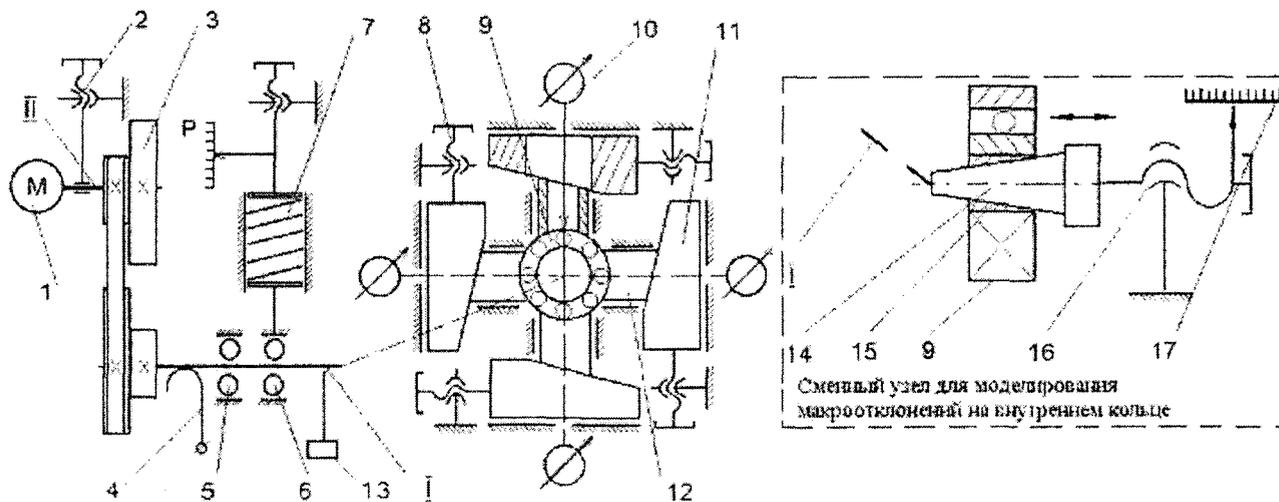
Совокупность элементов 8, 10-12 образует узел деформации и смещения колец подшипника. Деформация кольца создается с помощью клиноплунжерной передачи. Клин 11, перемещаясь в направляющих, передает движение от винтовой пары 8 на плунжер 12, который непосредственно воздействует на наружное кольцо подшипника 9, создавая тем самым его деформацию или смещение.

Устройство содержит четыре клино-плунжерные передачи, расположенные на взаимно перпендикулярных осях, что дает возможность деформировать и смещать кольцо подшипника в четырех направлениях. Информация о полученных смещениях или деформации считывается оператором с индикаторов 10.

Для исследования влияния макрогеометрии внутреннего кольца на диагностический параметр установка оснащена сменным узлом – устройством деформации внутреннего кольца, выполненным на основе конусной втулки 15 и конусного вала 14. Перемещая вал 14 в горизонтальном направлении с по-

мощью винтовой пары 16, добиваются деформации внутреннего кольца исследуемого подшипника 9, что приводит за счет конструктивных особенностей вала 15 и втулки 14 к изменению макрогеометрии его дорожки качения.

Установка имеет привод, выполненный на базе двигателя постоянного тока 1, который с помощью вала II и цепи гибкой связи 3 (ремень и двухступенчатые шкивы, обеспечивающие передаточные отношения  $i = 2$  и  $i = 0,5$ ) передает движение на рабочий вал I. Сила натяжения ремня регулируется с помощью узла 2.



Основные технические характеристики:

- диапазон моделирования отклонения от круглости, мкм: ..... до 120;
- диапазон моделирования отклонения от соосности, мкм: ..... до 120;
- диапазон моделирования натяга, мкм: ..... до 100;
- основная погрешность измерения деформации и смещения кольца подшипника, не более мкм: ..... 2;
- радиальная нагрузка на подшипник, Н: ..... 0...250;
- погрешность задания нагрузки, %: ..... 2 %;
- частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>: ..... 0...6000;
- габаритные размеры установки, мм: ..... 500 x 350 x 300.

Рис. 2. Кинематическая схема экспериментальной установки

Для обеспечения оценки состояния подшипника электрическими методами установка снабжена токо-съемным устройством 4. Для реализации виброакустических методов диагностирования установка снабжена посадочными местами для датчиков вибрации. Их установка возможна как в непосредственной близости от исследуемого подшипника в радиальном и осевом направлении, так и вблизи второстепенных подшипников для реализации дифференциального метода измерения. Установка содержит также устройство измерения и стабилизации частоты вращения вала, содержащее блок питания, датчик частоты вращения и электронную схему ее стабилизации.

Предварительно проводилась аттестация устройства моделирования макроотклонений колец. С помощью регулировочных винтов производилось моделирование заданного макроотклонения дорожки качения отдельно взятого кольца подшипника. После достижения требуемого значения макроотклонения (по показаниям индикаторов 10) регулировочные

винты фиксировались, узел деформации и смещения колец демонтировался, и с помощью аттестованного измерительного оборудования (нутромер индикаторный, кругломер АБРИС) оценивалось действительное значение макроотклонения дорожки качения кольца. Это значение сопоставлялось со значением деформации колец на индикаторах 10. Результаты аттестации представлены на рис. 3.

Как видно, зависимость в заданных выше пределах близка к линейной. По полученным для требуемых значений макроотклонений результатам строились градуировочные характеристики, связывающие значения макроотклонения дорожки качения с деформацией кольца.

Измеритель НИВ выполнен на основе серийно выпускаемого частотомера GFC-8010H (рис. 4). Отличим измерителя от ранее применяемых является то, что входная цепь построена на основе низкоомной мостовой схемы. Поэтому входное сопротивление измерителя не превышает 10 Ом, что значительно повышает

помехозащищенность и снижает влияние на результаты измерения собственных ЭДС подшипника.

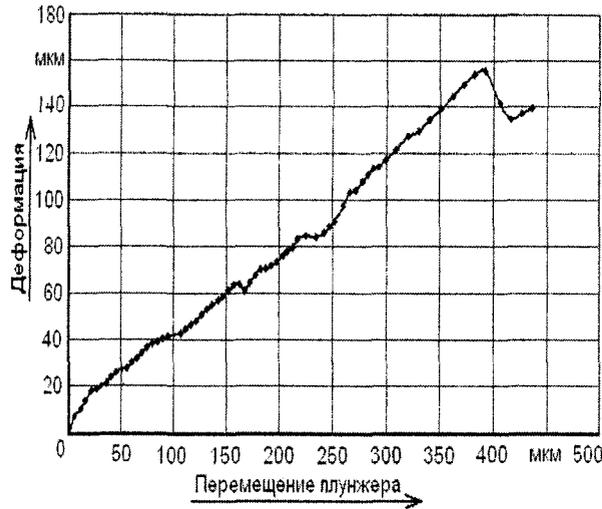
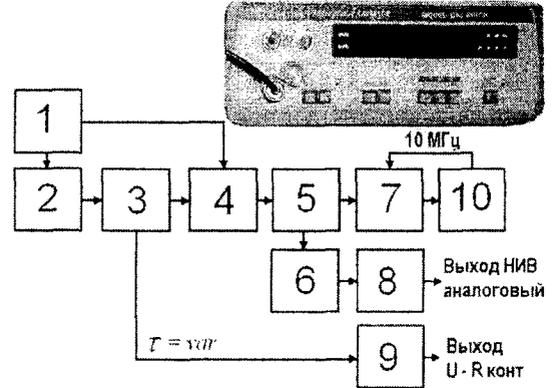


Рис. 3. Градуировочная характеристика узла деформации и смещения колец

Измеритель работает следующим образом. Исследуемый подшипник включается в одно из плеч мостовой схемы 2, запитанной от стабилизатора 1. Режим питания моста может быть выбран либо по току, либо по напряжению. При изменении сопротивления подшипника происходит изменение тока в измерительной диагонали мостовой схемы. Это изменение фиксируется преобразователем ток – напряжение 3, построенном на высокочастотных операционных усилителях. Усиленное напряжение, пропорциональное сопротивлению подшипника поступает на первый вход быстродействующего компаратора напряжения 3. На второй вход компаратора поступает напряжение с формирователя меры (стабилизатора 1). При нахождении сопротивления ниже заданного порога на выходе компаратора формируется импульс напряжения. Для улучшения характеристик измеритель снабжен формирователем фронта 5 импульса. Далее сигнал разветвляется на вход цифрового измерения (логический элемент 7, частотомер 10) и на вход аналогового измерения (интегратор 7, нормирующий усилитель 8). При цифровом измерении импульс напряжения с выхода формирователя 5 поступает на логический элемент 7, где заполняется высокочастотными импульсами с частотомера (10 МГц). Частотомер производит последовательный счет этих импульсов, число которых пропорционально измеряемому параметру НИВ.

В аналоговой цепи импульсы с выхода формирователя фронта 5 поступают на интегратор 6. Выходное напряжение интегратора 6 пропорционально отношению длительности импульсов снижения сопротивления подшипника ниже заданного порога к времени интегрирования, т.е. параметру НИВ. Нормирующий усилитель 8 согласует уровень выходного сигнала аналогового канала измерителя с входными сигналами серийных систем сбора данных.

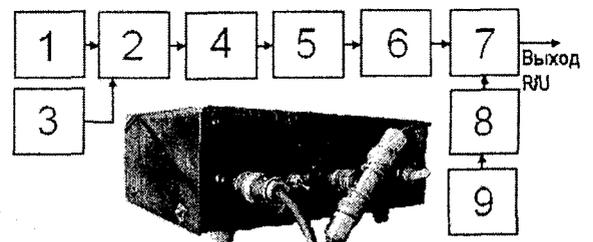
Измеритель НИВ также имеет аналоговый выход, напряжение которого пропорционально импульсу сопротивления подшипника. Для формирования такого сигнала в схеме предусмотрен нормирующий усилитель 9. Представленный измеритель позволяет зарегистрировать импульсы микроконтактирования с минимальной длительностью 0,5 мкс при пороге срабатывания 100 Ом.



- 1 - стабилизатор питания моста и формирователь меры
- 2 - мостовая схема с низкоомными плечами (3...6 Ом)
- 3 - преобразователь ток-напряжение (AD8011, AD8032)
- 4 - компаратор напряжения (время срабатывания 3 нс)
- 5 - формирователь фронта
- 6 - интегратор
- 7 - логический элемент
- 8, 9 - нормирующий усилитель
- 10 - частотомер GFC-8010H

Рис. 4. Измеритель параметра НИВ

Для проверки работоспособности каналов измерения сопротивления подшипника и измерителя НИВ необходимо иметь меру, имеющую на выходе нормировано изменяющееся сопротивление. Так как измерительные приборы должны регистрировать импульсы микроконтактирования длительностями в единицы микросекунд, то мера должна позволять сформировать такой импульс сопротивления. Так же на выходе меры должно быть минимальное значение ЭДС шума. В настоящей работе в качестве такой меры предложено использовать разработанный пульсатор сопротивления (рис. 5).



- 1 - генератор тактовых импульсов
- 2 - делитель частоты с управляемым коэф. деления
- 3 - устройство управления коэффициентом деления
- 4 - формирователь фронта
- 5 - цепь управления ключом
- 6 - электронный ключ на МОП-транзисторах (Твкл = 30 нс)
- 7 - образцовый резистор
- 8 - коммутатор
- 9 - источник тока

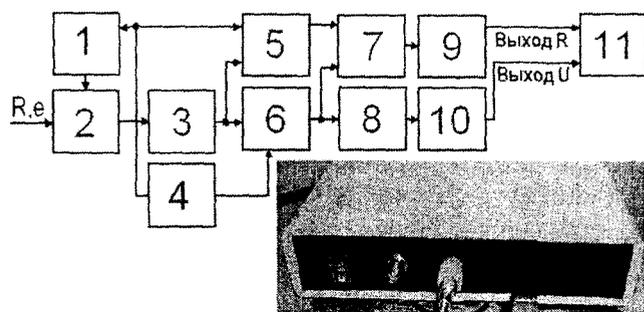
Рис. 5. Пульсатор сопротивления

В основе принципа работы пульсатора заложен высокоскоростной ключ на МОП транзисторах с индущированным каналом. Сопротивление такого транзистора в открытом состоянии обычно ниже 100 Ом, сопротивление закрытого канала практически всегда выше единиц МОм.

Пульсатор работает следующим образом. Управляющий сигнал с внутреннего генератора 1 тактовых импульсов поступает на делитель частоты 2 с управляемым с помощью устройства управления 3 коэффициентом деления. Делитель позволяет создать последовательность импульсов напряжения с заданными частотно временными характеристиками (необходимо при задании значения параметра НИВ). Сигнал с блока 3 поступает на формирователь фронта 4, где происходит формирование фронта импульса в заданных пределах. Сформированный сигнал поступает на высокоскоростную схему 5 управления ключевым транзистором 6. Транзистор коммутирует в цепь выходного сигнала образцовый резистор с требуемым сопротивлением. Для получения на выходе импульсов напряжения, пропорциональных коммутируемому сопротивлению, в схеме предусмотрен подключаемый источник тока 9.

Предлагаемый пульсатор позволяет получать импульсы сопротивления в диапазоне от 70 Ом до 1 МОм и в частотном диапазоне до 10 МГц. Принципиальная работоспособность пульсатора подтверждена на оборудовании Г5-54, С1-96.

Для измерения сопротивления подшипника качения на фоне значительных ЭДС, возникающих в нем и от дополнительных наводок предлагается использовать измеритель сопротивления с разделением составляющих ЭДС и  $R$  (далее измеритель  $R$ ). Для измерения  $R$  можно использовать источник напряжения и источник тока. Источник напряжения, включенный в цепь измеряемого сопротивления, позволяет получить сигнал, пропорциональный проводимости. Однако для подшипников средняя проводимость не всегда является величиной обратной среднему сопротивлению, поэтому в измерителе  $R$  (рис. 6) используется источник тока.

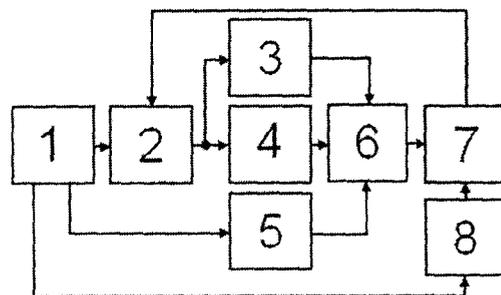


- 1 - коммутируемый источник тока 1 мкА
- 2 - шунтирующий резистор (ограничитель напряжения на подшипнике)
- 3 - повторитель напряжения
- 4 - генератор тактовых импульсов
- 5, 6 - устройство выборки-хранения (УВХ)
- 7 - дифференциальный усилитель
- 8 - нормирующий усилитель
- 9, 10 - фильтр низких частот (ФНЧ)
- 11 - система сбора данных M9001 LabVIEW

Рис. 6. Измеритель  $R$

Для предотвращения возникновения опасных с точки зрения пробоя смазочной пленки напряжений значение тока выбирается минимально возможным для определенного диапазона сопротивления, и подшипник шунтируется ограничительным резистором. Так как через подшипник пропускается очень маленький по значению стабильный ток, то при малой толщине смазочной пленки (малом сопротивлении) на ней падает маленькое значение напряжения и пробой практически невозможен. При больших значениях толщины пленки пробой маловероятен.

Выделение составляющей напряжения, пропорциональной сопротивлению подшипника основано на принципе раздельной во времени (с высокой частотой) записи сигнала при подключенном источнике тока и без него. При этом сначала регистрируется сигнал, содержащий в себе шумовые составляющие (термо- и трибо-ЭДС) и полезный сигнал. Затем регистрируется только шумовая составляющая. Значения результатов измерения запоминаются и затем вычитаются. Далее измерения с высокой частотой циклически повторяются.



- 1 - Объект диагностирования (подшипник)
- 2 - коммутирующее устройство
- 3 - канал аналогового измерения НИВ
- 4 - канал аналогового измерения  $R$  и  $U$
- 5 - канал измерения вибрации
- 6 - согласующее устройство
- 7 - система сбора данных
- 8 - канал контроля кинематики

Рис. 7. Структура совместного измерения электрических и виброакустических параметров

Указанный принцип реализован в устройстве для измерения  $R$  (рис. 6). Коммутируемый источник 1 тока периодически подключается к измерительной цепи, в которой содержится диагностируемый подшипник, шунтирующий резистор 2 и электрометрический повторитель (усилитель) 3. Сигнал выхода блока 3 поступает на УВХ 5, 6 которые запоминают значения сигнала при подключенном и отключенном источнике тока. Для обеспечения стабильности работы входные цепи УВХ снабжены фильтрами низких частот. Выходные сигналы УВХ поступают на входы дифференциального усилителя 7, где происходит их вычитание. Выходной сигнал усилителя 7 сглаживается фильтром 9 и поступает на систему сбора данных 11. Схема также позволяет регистрировать и общий уровень электрических шумов подшипника (блоки 8, 10). Изготовленный макет измерителя  $R$

работает в диапазоне сопротивлений от 41 кОм до 1 МОм и в частотном диапазоне до 25 кГц.

Для проведения экспериментальных исследований по выявлению корреляционных зависимостей между электрическими и виброакустическими диагностическими параметрами предлагается структурная схема прибора совместной регистрации электро- и вибросигналов (рис. 7).

Диагностируемый подшипник или подшипниковый узел через коммутирующее устройство поочередно подключается к входным цепям измерителя НИВ (канал аналогового измерения НИВ 3) и измерителя R (канал 4 аналогового измерения R и U). При этом система по параллельному каналу 5 производит регистрацию сигнала вибрации. Согласующее устройство 6 приводит уровни выходных сигналов всех каналов с

соответствие с унифицированными уровнями системы сбора данных. Так же предусмотрена регистрация кинематических параметров узла с помощью блока 8.

В качестве диагностических параметров при совместном диагностировании предлагается использовать такие параметры, как совместная дисперсия сигнала вибрации и электрического сигнала, функция взаимной корреляции и взаимная спектральная плотность в заданной полосе частот. Применение совместного диагностирования значительно расширяет возможности как электрического, так и вибрационного метода и улучшает достоверность диагностирования.

Предложенный комплект устройств и приборов позволит реализовать большинство известных методов диагностирования по электрическим параметрам.

УДК 620.179.1

*Асп. Волчков А.Н., канд. техн. наук, доц. Пахолкин Е.В., канд. хим. наук, проф. Сычев С.Н., канд. техн. наук, Гаврилина В.А.  
(Орловский государственный технический университет,  
Орловский государственный институт экономики и торговли)  
г. Орел, тел. (4862) 419892; E-mail: [chemistry@ostu.ru](mailto:chemistry@ostu.ru), [Eugene\\_P@vpost.ru](mailto:Eugene_P@vpost.ru)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*The complex researches of characteristics the motor oils in the process of exploitation are describe. The methodic and equipment for experimental researches is offer. The description of original device for the diagnostic the motor oil by electrical parameter is give.*

### **Введение**

Выдвинутая в работах [1, 2] гипотеза об увеличении диэлектрической проницаемости и содержания кислородсодержащих соединений, а также уменьшения концентрации присадок в процессе эксплуатации моторного масла проверена экспериментально. Сущность эксперимента заключалась в измерении диэлектрической проницаемости проб моторного масла, а также содержания кислородсодержащих соединений и присадок в масле при различных значениях пробега автомобилей.

### **Экспериментальная часть**

В эксперименте использовались полусинтетические моторные масла марок UTECH, SAE 10W40 и BP VISCO 3000, SAE 10W40. Испытания проводились на автомобилях «Волга» ГАЗ 3110 и «Баргузин» производства Горьковского автозавода. К моменту испытаний автомобиль «Волга» имел пробег 50 тыс. км, а «Баргузин» – 31,83 км. Время проведения экс-

перимента – август, сентябрь, начало октября 2005 г. (сухая погода без дождей). Доминирующие условия эксплуатации автомобиля «Волга» – городские со средним недельным пробегом 250 – 800 км. Доминирующие условия эксплуатации автомобиля «Баргузин» – дальние (междугородные) поездки.

*Измерение диэлектрической проницаемости производилось с помощью установки, составленной из следующих элементов:*

- а) универсальный измерительный мост Е7-4;
- б) измерительная цилиндрическая ячейка двухзатяжимного типа по ГОСТ 6581-75, электрическая емкость пустой измерительной ячейки равна 34,4 пФ;
- в) термометр и вспомогательные принадлежности.

*Измерение диэлектрической проницаемости проводилось по следующему алгоритму:*

- контроль температуры в лаборатории;
- подготовка измерительной ячейки (очистка рабочих поверхностей);

- измерение электрической емкости измерительной ячейки с воздухом;
- подготовка пробы и заполнение измерительной ячейки исследуемым маслом;
- измерение электрической емкости измерительной ячейки с маслом;
- выполнение действий по ГОСТ 6581-75 для определения паразитной емкости;
- расчет значения диэлектрической проницаемости по ГОСТ 6581-75.

Подготовка измерительной ячейки к измерению предполагала очистку рабочих поверхностей Н-гексаном. Ячейка также промывалась после каждого измерения.

*Измерение относительных концентраций присадок и кислородсодержащих соединений, образующихся в результате деструкции присадок и основных компонентов масел, осуществлялось методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ) на микроколоночном жидкостном хроматографе «Милихром-5» со сканирующим УФ-детектором (в диапазоне 190 – 360 нм).*

*Условия хроматографического эксперимента:*

- колонка хроматографическая аналитическая КАХ-6-80-4, заполненная Сепароном С18 (5 мкм);
- элюент: «ацетонитрил – вода» в соотношении 65:35 по объему; использовалась дистиллированная вода и ацетонитрил сорта №2 фирмы «Криохром» (Санкт-Петербург);
- расход элюента 100 мм<sup>3</sup>/мин;
- длины волн 210, 220, 230, 254, 270 нм;
- постоянная времени 0,4 с;
- объем элюента: 2500 мм<sup>3</sup>, из них 300 мм<sup>3</sup> – на регенерацию колонки;
- объем пробы 6 мм<sup>3</sup>.

*Подготовка пробы.* Подготавливается смесь из 5 см<sup>3</sup> моторного масла и 5 см<sup>3</sup> элюента. Смесь встряхивается и отстаивается в течение 30 минут. Для анализа шприцем забирается 300 – 400 мм<sup>3</sup> водно-ацетонитрильного экстракта.

Результаты исследования относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  в зависимости от значений пробега для автомобилей «Волга» и «Баргузин», а также результаты хроматографии на начальных участках пробега приведены в таблицах 1 и 2, а также иллюстрируются рис. 1.

Таблица 1 – Результаты исследований для автомобиля «Волга»

Площадь S пика №1 добавки в моторном масле	Относительная концентрация $C_d$ добавки в масле	Относительная концентрация $C_k$ кислородсодержащих продуктов деструкции добавки	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$	Пробег, км
1,683	1	0	2,153	0
1,388	0,825	0,175	2,208	467
0,688	0,409	0,591	2,230	1779
0,279	0,166	0,834	2,236	2271
0,246	0,146	0,854	2,242	3123
0,171	0,102	0,898	2,264	4134

Таблица 2 – Результаты исследований для автомобиля «Баргузин»

Площадь S пика № 1 добавки в моторном масле	Относительная концентрация $C_d$ добавки в масле	Относительная концентрация $C_k$ кислородсодержащих продуктов деструкции добавки	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$	Пробег, (км)
3,700	1	0	2,139	0
1,033	0,279	0,721	2,162	274
0,225	0,061	0,939	2,182	1131
0,167	0,045	0,955	2,217	1531
0,150	0,041	0,959	2,268	2877
0,025	0,007	0,993	2,406	5592

**Обсуждение результатов**

Как и ожидалось, диэлектрическая проницаемость моторного масла возрастает с увеличением пробега. Однако гипотеза авторов о том, что зависимости  $\epsilon_r$  от пробега будут содержать явно выраженные перегибы, не подтвердилась. Показанные на рис. 1 зависимости мало пригодны для получения критериев отказа моторного масла.

В такой ситуации определенные надежды возлагались на зависимость  $\epsilon_r$  моторного масла от содержания кислородсодержащих соединений, получающихся за счет деструкции добавки (комплекса присадок), улучшающей качество моторного масла. Дан-

ная гипотеза имеет смысл: с одной стороны, присадки нужны для увеличения срока службы масла и должны расходоваться в первую очередь, а с другой – количественно отследить относительное изменение содержания одной добавки вполне возможно. Корректно оценить относительное изменение количества продуктов деструкции и окисления всех компонентов моторного масла не представляется возможным. Таким образом, основной целью проведенного хроматографического эксперимента была количественная оценка относительного изменения содержания кислородсодержащих соединений, получаемых в результате деструкции улучшающей масло добавки.

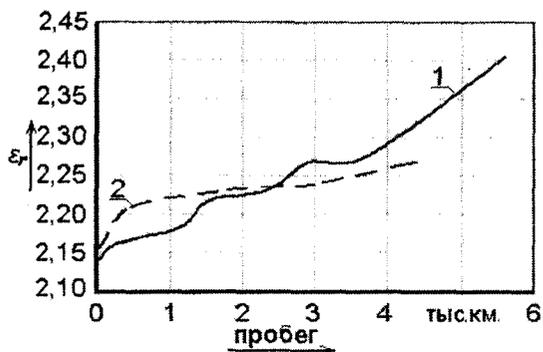


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости моторного масла от пробега: 1 – для автомобиля «Баргузин», 2 – для автомобиля «Волга»

При такой постановке задачи обработка результатов проводилась следующим образом: площадь хроматографического пика добавки в моторном масле при нулевом пробеге соответствовала относительной концентрации, равной 1.

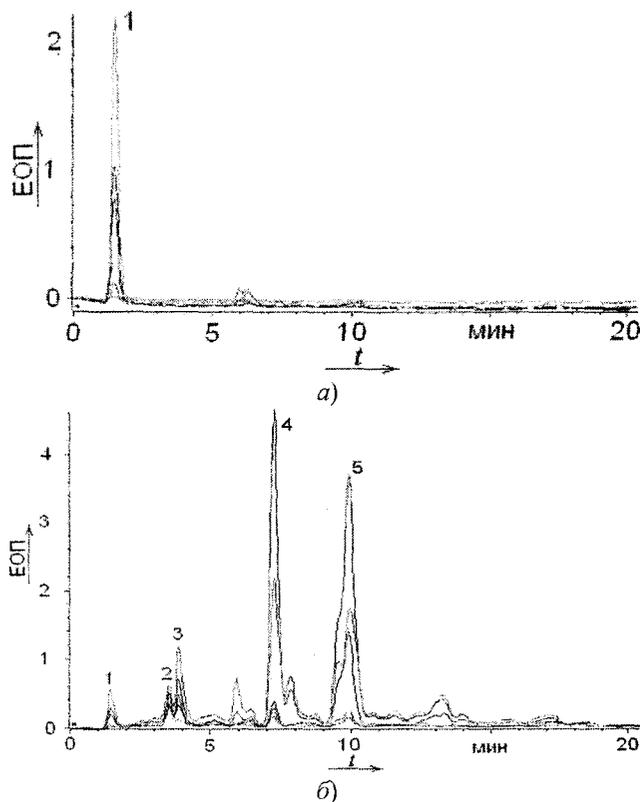
Относительная концентрация продуктов деструкции добавки принималась за ноль. Относительная концентрация добавки при определенном пробеге получалась путем деления площади пика добавки для данного пробега на площадь пика при нулевом пробеге, а относительная концентрация кислородсодержащих соединений, получаемых в результате деструкции добавки, получена путем вычитания из единицы относительной концентрации добавки.

Из таблицы 1 хорошо видно, что площадь хроматографического пика добавки в моторном масле уменьшается при увеличении пробега как для автомобиля «Волга», так и для автомобиля «Баргузин». Количество кислородсодержащих соединений, получающихся в результате эксплуатации моторного масла непрерывно возрастает, что видно из хроматограмм на рис. 2 и из результатов обработки хроматограмм методом главных компонент, сведенных в таблицу 3.

Рис. 2 объясняет резкое возрастание  $\epsilon_r$  моторного масла на начальной стадии эксплуатации: оно связано одновременно с деструкцией добавки в масле и попаданием в масло значительного количества ароматических компонентов бензина.

В этом плане существенный интерес представляют зависимости диэлектрической проницаемости от пробега, «очищенные» от вклада ароматических

компонентов бензина, попавших в масло. Такие зависимости представлены на рис. 3.



1 – добавка в моторном масле; 2,3 – наиболее заметные кислородсодержащие соединения, получающиеся при деструкции добавки 1; 4,5 – ароматические компоненты бензина, попавшего в моторное масло

Рис. 2. Хроматограммы водно-ацетонитрильных экстрактов моторного масла, используемого в авт. «Баргузин»: а – пробег 0 км; б – пробег 274 км

Необходимо обратить внимание, что, несмотря на разную динамику возрастания  $\epsilon_r$ , обусловленную разным качеством исходных моторных масел и особенностью режимов эксплуатации, после пробега в 4500 км  $\epsilon_r$  двух масел практически выравниваются.

На рис. 4 представлены зависимости  $\epsilon_r$  от относительной концентрации кислородсодержащих соединений  $k_{окс}$ , полученных в результате деструкции добавки в масле для автомобилей «Волга» и «Баргузин».

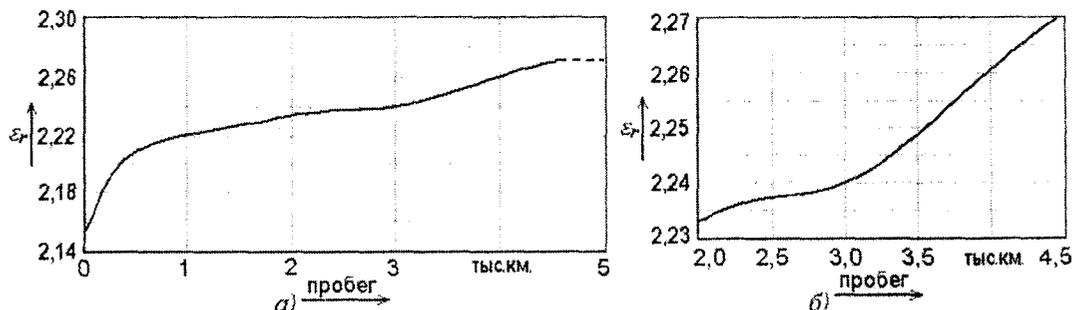


Рис. 3. Исправленные зависимости диэлектрической проницаемости моторного масла от пробега автомобиля (без вклада в  $\epsilon_r$  ароматических компонентов бензина): а – «Волга», б – «Баргузин»

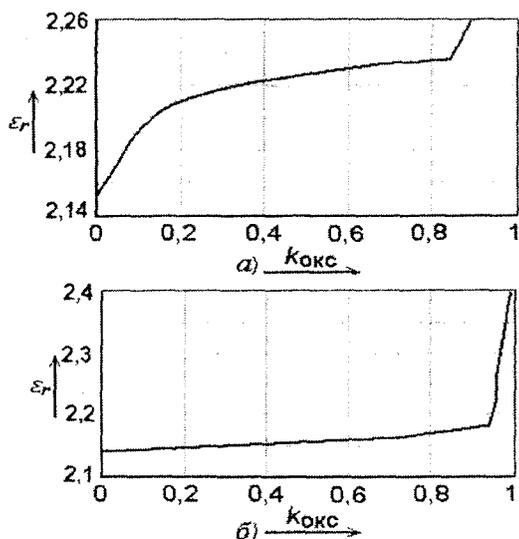


Рис. 4. Зависимость  $\epsilon_r$  моторного масла от  $k_{окс}$  для автомобилей: а – «Волга», б – «Баргузин».

Из рис. 4 следует, что предельной  $\epsilon_r$ , характеризующей полную выработку добавки и начало неконтролируемого окисления компонентов масла служит  $\epsilon_r = 2,3$ . Это соответствует резкому перегибу на графиках рис. 4 при значении пробега 4 – 5 тыс. км. Таким образом, существующее общепринятое мнение, что масла типа М6/12Г достаточно менять через каждые 10 тыс. км, обоснованно можно подвергнуть сомнению.

Подтверждением тому служит опыт эксплуатации стандартного автомобиля ВАЗ 1111: масло данного типа меняли через каждые 5 тыс. км, а не через 8 – 10 тыс. км, как рекомендовано. В результате пробег автомобиля без капитального ремонта двигателя составил 140 тыс. км при среднем пробеге автомобилей

этого типа без капитального ремонта 70 – 75 тыс. км (при замене масла через 8 – 10 тыс км).

**Выводы**

1 Исследованы зависимости диэлектрической проницаемости и относительной концентрации добавки, улучшающей свойства моторного масла, от пробега.

2 Показано, что предельным значением  $\epsilon_r$  моторного масла данного типа, за которым начинается неконтролируемое окисление основных компонентов масла, является 2,3, что соответствует резкому перегибу на графиках рис. 4 для пробега 4 – 5 тыс. км.

3 Снижение пробега автомобиля на одном моторном минеральном масле до 5 тыс. км вместо рекомендованных 8 – 10 тыс. км увеличивает пробег автомобиля без капитального ремонта двигателя вдвое.

4 На основе исследований показано, что для оценки качества масла в двигателе может быть использован датчик с предельным фиксированным значением диэлектрической проницаемости, характерного для конкретного типа моторного масла.

**Литература:**

1. Сычев, С.Н. Теоретическая оценка характера изменения диэлектрической проницаемости моторного масла в процессе эксплуатации [Текст] / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, В.А. Гаврилина, Е.В. Пахолкин, А.Н. Волчков // Изв. ОрелГТУ. Естественные науки. – 2005. – № 1-2.
2. Сычев, С.Н. Теоретическое обоснование контроля моторных масел электрическим методом (по значению диэлектрической проницаемости) [Текст] / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12.

УДК 621.822.6-97: 621.317.757.08

Д-р техн. наук, проф. Корндорф С.Ф., асп. Чекашова Н.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, (4862)419876; E-mail: pms@ostu.ru

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ**

*In clause the opportunity of measurement of temperature of a lubricant film in bearings thermo noise were shows by a method. At a stationary mode of friction for increase of accuracy of the control of temperature serial measurement thermoelectric power and resistance of a lubricant film were recommended.*

Способность смазочной пленки разделять трущиеся поверхности напрямую зависит от температуры самой смазки. Поэтому важно осуществлять контроль температуры смазочного материала. Для уменьшения трибологических потерь и снижения износа фрикционных систем применяют различные смазочные материалы, антифрикционные способно-

сти которых в значительной степени зависят от эксплуатационной температуры.

Повышение температуры в зоне трения трибосопрежения, работающего со смазкой, приводит к уменьшению вязкости смазочного материала, и, следовательно, к уменьшению толщины смазывающего слоя (режим граничного трения). В некоторые мо-

менты времени может происходить разрушение смазочной пленки (режим ювенального трения), что резко повышает износ пар трения, может привести к заклиниванию узла и повреждению всего устройства.

Поэтому необходимо контролировать температуру смазочной пленки в зоне трения, что позволит предотвратить возможные аварийные ситуации путем изменения условия работы системы или путем ее своевременного выключения. В настоящее время не известны методы непосредственного измерения данной температуры. Для этих целей при жидкостном трении обычно используют различные методы, связанные с моделированием тепловых процессов в зоне трения по значениям температуры, измеренным в точках, расположенных на различных расстояниях от зоны трения, а также методы цветов побежалости, индикаторов и плавких вставок [1]. Недостатком первых является невысокая точность. Кроме того, их применение требует нарушения целостности объекта контроля за счет внедрения в его тело преобразователей температуры. Другие методы позволяют определить температуру как результат ее последствия по окончании процесса трения при демонтаже узла. При этом введение в зону трения индикаторных красок и плавких вставок изменяет сам процесс трения.

Для решения поставленной задачи возможно применение термозумового метода, основанного на зависимости интенсивности тепловых электрических шумов смазочной пленки от ее температуры [2]. Смазочная пленка в этом случае рассматривается как проводник с большим сопротивлением, а ее активное сопротивление – как источник тепловых электрических шумов. Суть метода состоит в измерении среднеквадратического значения напряжения тепловых шумов, которое зависит от температуры пленки.

Среднеквадратическое значение ЭДС тепловых шумов определяется формулой Найквиста:

$$\overline{E_{ш}^2} = 4 \cdot k \cdot \Delta f \cdot \Theta \cdot Re Z, \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;

$\Theta$  – абсолютная температура;

$Re Z$  – активная составляющая сопротивления;

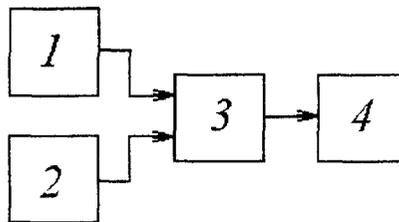
$\Delta f$  – полоса частот измерения.

Обязательным условием для реализации термозумового метода является обеспечение постоянства сопротивления смазочной пленки, но это условие в работающем трибосопряжении не выполняется. Изменения сопротивления смазочной пленки в зоне трения являются случайными процессами и в каждый момент времени принимают случайные значения. В связи с этим возможность применения термозумового метода должна быть рассмотрена с учетом непостоянства температуры и сопротивления пленки.

При использовании термозумового метода для измерения температуры плёнки полоса пропускания частот может быть заранее задана в зависимости от используемых средств измерения напряжения. Для определения температуры нужно знать флуктуирую-

щее сопротивление смазочной пленки, поэтому необходимо разработать установку, позволяющую измерять напряжение шумов и сопротивление пленки.

Решение этой задачи можно осуществить следующим способом. Если процесс трения рассматривать как стационарный, возможно поочередное измерение напряжения шумов и сопротивления пленки. Но в этом идеализированном случае измеренное сопротивление не соответствует реальному сопротивлению в момент измерения напряжения шумов. Поэтому при расчете погрешности определения температуры необходимо учитывать дисперсию значений сопротивления пленки. Реализация способа осуществляется с помощью экспериментальной установки (рис. 1).

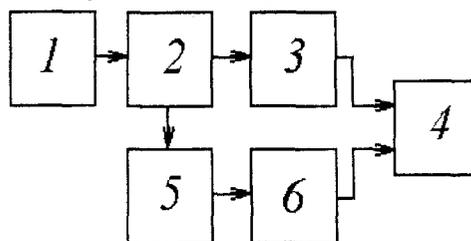


1 - блок для измерения среднеквадратического значения напряжения шума; 2 - блок для измерения среднего сопротивления  $R_{cp}$  за тот же самый интервал времени  $t$ ; 3 - коммутатор; 4 - микропроцессор

Рис. 1. Структурная схема установки для измерения напряжения шумов в стационарном режиме трения

Реализация данного способа возможна, если значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения результатов измерения за определенный интервал времени стремятся к значениям, измеренным в любой другой промежуток времени.

На практике удобнее использовать другой метод, при котором напряжение шумов и сопротивление смазочной плёнки измеряются одновременно, но в различных частотных каналах. Если измерения проводятся на высоких частотах и применяемые каналы отличаются по частоте незначительно, то практически можно считать, что измерение сопротивления проводится на той же частоте, что и измерения термозумового напряжения. Такой способ может быть реализован при помощи установки, структурная схема которой представлена на рис. 2.



1 - генератор частоты, 2 - объект исследования, 3 - блок для измерения  $R_{cp}$  за время  $t$ , 4 - микропроцессор, 5 - фильтр 6 - блок для измерения среднеквадратического значения напряжения шума

Рис. 2. Структурная схема установки, реализующей метод с частотным разделением каналов

Поскольку сопротивление смазочной плёнки имеет ёмкостной характер, а значение термошумового напряжения определяется активной составляющей этого сопротивления, то для определения последнего необходимо разработать специальную методику. Обычно измерения ёмкостных сопротивлений проводится с помощью измерителей добротности. На выбранной частоте измерения  $\omega_0$  настраивают контур измерителя добротности и замечают соответствующие этой настройке значения ёмкости переменного конденсатора  $C_1$  измерителя добротности и значения добротности  $Q_1$ . По указанным значениям определяют волновое (характеристическое) сопротивление контура:  $\rho = 1/\pi\omega_0 C_1$ , и затем активное сопротивление потерь контура:  $r_k = \rho/Q_1$ . После этого через ёмкостной токоёмник к измерителю добротности подключают сопротивление исследуемого подшипника. Если ёмкость токоёмника достаточно велика, то практически можно считать, что измеренное сопротивление плёнки подключается параллельно ёмкости конденсатора контура и его сопротивлению потерь. Затем контур измерителя добротности вновь настраивается в резонанс на ту же частоту и определяется новое значение ёмкости конденсатора  $C_2$  и добротности  $Q_2$ , так как ёмкость, образуемая подшипником  $C_n$ , подключена параллельно ёмкости контура  $C_k$ , то она с достаточной степенью точности может быть вычислена по формуле:  $C_n = C_1 - C_2$ .

Значительно сложнее расчёт активной составляющей сопротивления подшипника  $R_n$ . При составлении схемы замещения, активные сопротивления потерь подшипника  $R_n$  и контура  $R_k$  можно рассматривать, как включённые параллельно ёмкостным со-

противлениям. В этом случае  $R_k = \rho \cdot Q_1$ . Поскольку при первом и втором измерениях резонансная частота и ёмкость контура остаются неизменными, то не изменяется и волновое сопротивление контура. По новому значению добротности  $Q_2$  находят сопротивление потерь контура и подшипника  $R_{общ} = \rho \cdot Q_2$ .

Так как  $R_k$  и  $R_n$  включены параллельно, то:

$$R_n = R_k \cdot R_{общ} / (R_k + R_{общ}) \quad (2)$$

При проведении серии измерений с целью определения вариации сопротивления  $R_n$  значения  $\omega_0$ ,  $C_1$ ,  $R_k$ ,  $Q_1$  постоянны и, следовательно  $R_n = f(Q_2, C_2)$ .

Для облегчения расчётов при конструировании измерительной установки может быть предусмотрено включение в цепь обработки сигналов микропроцессора, а при предварительных исследованиях целесообразно использование номографического метода. Описанный способ позволяет определить  $R_n$ , включённое параллельно ёмкости подшипника.

Если для расчёта шумов удобнее использовать последовательную схему замещения, то соответствующее ей сопротивление потерь  $r_n = 1/\omega_0 \cdot C_n^2 \cdot R_n$ .

**Литература:**

1 Горбунов Р.А. Метод и средство контроля температуры смазочной плёнки подшипников качения в режиме жидкостного трения // Автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. техн. наук. Орёл: ОрелГТУ, 2001. - 16 с.  
2 Саватеев, А.В. Шумовая термометрия. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. - 132 с.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Д-р техн. наук, проф. Подмастерьев К.В., канд. техн. наук Марков В.В., канд. техн. наук, доц. Мишин В.В. (Орловский государственный технический университет) г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРИБООБЪЕКТОВ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ

*The generalized approach to mathematical modeling the electrical resistance of the different tribological objects is offer. The methodic of modeling and the mathematical models of the electrical resistance friction contact is elaborate. The methodic is corresponding the bases schemes of contact the surfaces by boundary lubrication.*

**Постановка задачи моделирования**

При разработке методов и средств испытаний, диагностирования, контроля и прогнозирования технического состояния различных трибообъектов – узлов трения машин и механизмов, пар трения испытательного оборудования и т.п. возникает необходи-

мость в проведении теоретических исследований по выявлению зависимостей между характеристиками технического состояния трибообъекта и электрическими признаками и параметрами, по обоснованию выбора и синтезу диагностических параметров, а также по обоснованию выбора алгоритмов, схем и

режимов испытаний (диагностирования). Обязательным условием проведения таких исследований является наличие математических моделей, описывающих процессы, происходящие в зонах трения, и характеризующих взаимосвязи между диагностическим признаком и совокупностью влияющих факторов.

В процессе реализации электрических методов трибоиспытаний и диагностики объект контроля рассматривается обычно как многоэлементный двухполюсник, к полюсам которого подключается диагностическая аппаратура. По значениям электрических параметров данного двухполюсника оценивают техническое состояние трибообъекта в соответствии решаемой диагностической задачей. При этом объект может включать в себя несколько деталей, определенным образом взаимодействующих друг с другом. В этой связи разработка математической модели какого-либо электрического параметра трибообъекта выполняется в три этапа. Первый этап заключается в построении эквивалентной электрической схемы замещения объекта, при этом выделяется совокупность элементарных ячеек – фрикционных контактов и устанавливаются электрические связи между ними (на рис. 1 в качестве примера представлена схема для подшипника качения). Второй этап заключается в анализе и разработке математического описания механических и механо-электрических процессов в отдельных фрикционных контактах объекта. Третий этап включает построение математической модели трибообъекта в целом на базе математических моделей отдельных фрикционных контактов и выявленных при построении схемы замещения электрических связей между ними. Таким образом, основу математической модели любого трибообъекта составляет модель отдельного фрикционного контакта двух деталей.

Очевидно, что в зависимости от выбранного электрического признака (параметра), вида смазки в трибообъекте и его конструктивных особенностей, подход к математическому описанию входящих в его состав фрикционных контактов и трибообъекта в целом может иметь свою специфику. В данной работе в качестве электрического диагностического признака рассматривается *электрическое сопротивление* и моделируется *граничный режим смазки*. Сделана попытка разработки обобщенного подхода к моделированию различных по конструктивному исполнению видов трибообъектов, включающего методику моделирования и базовые модели сопротивления элементарных типовых фрикционных контактов.

### Принятые допущения

Анализ возможных подходов к решению поставленной задачи [1 – 4] показал, что математическая модель процессов, определяющих флуктуации сопротивления фрикционного контакта, может быть получена при совместном использовании теории контакта реальных поверхностей и теории электропроводности контакта двух шероховатых тел [2, 3, 5]. Сложность процессов, происходящих в зонах трения,

не позволяет построить их строгое математическое описание без введения ряда ограничений и допущений. При разработке моделей в данной работе приняты следующие *допущения*:

- контакт поверхностей считается упругим, для описания макродеформаций используется теория Герца;
- для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя и по высоте единичного выступа;
- в качестве модели единичной неровности применяется сферический сегмент;
- для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется нормальный закон распределения вероятности;
- расчеты выполняются применительно к контакту шероховатой поверхности с гладкой, переход к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется путем оценки композиции законов распределения;
- влияние центробежных сил и гороскопических моментов не учитывается;
- электрическое сопротивление фрикционного контакта определяется сопротивлением стягивания.

### Структура математической модели

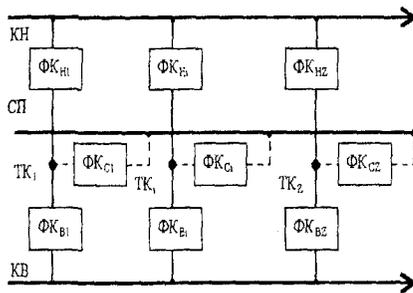
Теория электропроводности контакта шероховатых тел основана на предположении, что электрическое сопротивление контакта двух поверхностей, изготовленных из электропроводных материалов, определяется фактической площадью контакта (ФПК). Характерно, что не вся ФПК электропроводна (возможно наличие непроводящих пленок в пятнах реального контакта). Наряду с участками чистого металлического контакта присутствуют участки квазиметаллического контакта через тонкие туннельно проводящие пленки, окружающие пятна реального контакта [2]. Поэтому в первом приближении можно допустить правомочность высказанного положения, принятого за основу при моделировании.

ФПК является случайной величиной, зависящей от законов распределения материала по высоте шероховатого слоя контактирующих поверхностей и ряда конструктивных характеристик трибоспряжения, режимов и условий его работы. Указанные факторы оказывают совместное влияние на сопротивление фрикционного контакта, иллюстрируемое в общем случае схемой рис. 2.

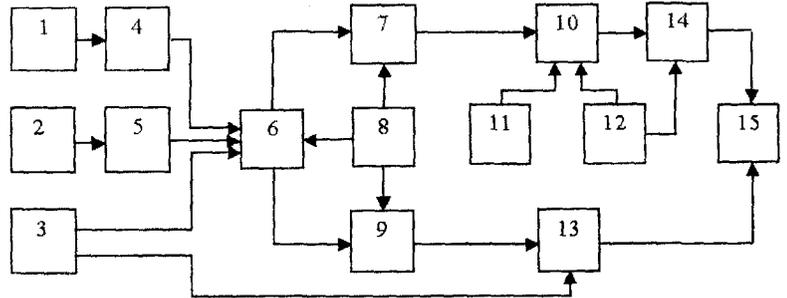
Фактическая площадь контакта  $A_f$  в общем случае определяется параметрами макрогеометрии контактирующих поверхностей (форма, размеры, радиусы кривизны, формирующие номинальную  $A_n$  и контурную  $A_c$  площади контакта, условную приведенную кривизну поверхностей), их шероховатостью, нагрузкой в контакте и упругими свойствами материалов [3, 6, 7]. Изменения шероховатости контактирующих поверхностей вызывают изменения закона распределения материала по высоте шероховатого слоя, который, в свою очередь, оказывает влияние на величину ФПК. Отклонения макрогеометрии деталей трибоспряжения (регулярные отклонения формы и расположения,

локальные дефекты поверхностей) приводят к изменению условной приведенной кривизны контактирующих поверхностей [1, 8], что также оказывает влияние на ФПК. Нагрузка и ФПК определяют величину фактического давления в зоне контакта [6] и размеры пятен металлического контакта [6, 7]. От фактического давления в зоне контакта зависит толщина смазочной пленки, которая рассчитывается по формулам контактно-гидродинамической теории с

учетом режима эксплуатации и свойств смазочного материала [1, 9]. Толщина смазочной пленки определяет ее сопротивление [2, 5]. Сопротивление стягивания определяется, исходя из размеров пятен металлического контакта и, совместно с сопротивлением смазочной пленки, определяет сопротивление фрикционного контакта [2, 5]. С учетом последнего допущения при моделировании применительно к граничному трению влиянием смазочного материала пренебрегаем.



КН, КВ – кольцо наружное и внутреннее; ТК<sub>i</sub> – *i*-е тело качения; СП – сепаратор; ФК<sub>нi</sub>, ФК<sub>вi</sub>, ФК<sub>сi</sub> – фрикционные контакты *i*-го тела качения с наружным кольцом, внутренним кольцом и сепаратором



1 – параметры макрогеометрии; 2 – шероховатость; 3 – свойства материалов; 4 – условная приведенная кривизна поверхностей; 5 – распределение материала по высоте шероховатого слоя; 6 – фактическая площадь контакта; 7 – фактическое давление в контакте; 8 – нагрузка; 9 – размеры пятен металлического контакта; 10 – толщина смазочной пленки; 11 – параметры режимов эксплуатации; 12 – свойства смазочного материала; 13, 14, 15 – соответственно, сопротивление стягивания, смазочной пленки, контакта

Рис. 1. Электрическая схема замещения подшипника качения

Рис. 2. Обобщенная схема построения модели сопротивления фрикционного контакта

**Моделирование геометрии поверхностей**

При обработке поверхности ее геометрия образуется в результате воздействия периодических факторов и случайных возмущений. Вид обработки, подача, биение шпинделя, профиль режущих кромок инструмента и другие постоянно действующие факторы определяют систематическую (периодическую) составляющую геометрии, а процессы, происходящие при деформации обрабатываемого материала (вырывы, сколы, наросты и т.п.), формируют ее случайную составляющую. В процессе монтажа узла геометрия рабочих поверхностей деталей может претерпевать изменения, характеризующиеся появлением дополнительных отклонений от правильной геометрической формы, а при эксплуатации и транспортировке могут появляться различные локальные дефекты. Таким образом, профиль реальной рабочей поверхности, имея систематические и случайные составляющие, характеризуется в общем случае регулярными отклонениями формы и расположения – макроотклонениями (например, для дорожки качения кольца подшипника качения – отклонениями от круглости в виде эксцентриситетности, овальности или огранки соответствующего порядка), локальными дефектами (трещины, риски, лунки, раковины и т.п.), а также шероховатостью.

При описании профиля поверхности наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании законов распределения вероятности высот неровностей, корреляционных функций, спектральной плотности распределения высот неровно-

стей, ряда Фурье, теории случайных полей [3, 6, 9, 10]. Каждый из методов обладает рядом достоинств и недостатков, подробный анализ которых выполнен в работах [1, 7]. На основе сравнительного анализа методов моделирования профилей тел вращения в качестве базового выбран метод гармонического разложения, согласно которому профиль представляется в виде совокупности гармонических составляющих отклонений текущего радиуса от геометрического центра его номинального сечения. Так, например, с учетом рекомендаций [8] радиус сечения поверхности тела вращения  $R_{пов}$  в зависимости от угловой координаты  $\varphi$  предложено описывать выражением:

$$R_{пов}(\varphi) = R_{пов0} + \sum_1^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (1)$$

- где  $R_{пов0}$  – средний радиус сечения;
- $Q_k, \varphi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники отклонения;
- $k$  – номер гармоники (первая характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трехвершинную огранку и т.п.);
- $p$  – предельный номер учитываемой гармоники.

Учитывая высокое качество рабочих поверхностей деталей трибосопряжений, которые, как правило, в качестве операций финишной обработки имеют шлифование или полирование, для описания шероховатости выбран метод, использующий законы распределения вероятности высоты неровностей профиля. Выбор обусловлен доминированием в профиле на уровне

шероховатости случайной составляющей (для шлифованных поверхностей с доводкой, отношение среднего квадратического отклонения случайной составляющей профиля к полному среднему квадратическому отклонению профиля  $R_q$  составляет 0,8 – 0,97 [6]).

Вероятностные методы математического описания микрогеометрии контактирующих поверхностей деталей трибосопряжения обладают рядом преимуществ. Они соответствуют случайному характеру изменения высоты микронеровностей на поверхностях и позволяют определить их наиболее вероятные значения. Среди законов распределения вероятности, пригодных для описания микрогеометрии поверхностей деталей машин, достаточно широкое распространение получили нормальное распределение [6] и распределение Найака [9], основанное на теории случайного поля, впервые предложенной для этой цели Линником и Хусу [11]. Нормальный закон распределения позволяет составить математическое описание шероховатости стальных шлифованных деталей. Распределение Найака в предельных случаях вырождается в распределение Рэлея (при наличии на поверхностях отдельных пиков большой высоты) и в нормальное распределение (при наличии пиков примерно одной высоты). Второй предельный случай пригоден для описания геометрии шлифованных и приработанных поверхностей деталей трибосопряжений:

$$f(h) = \frac{1}{R_q \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2 \cdot R_q^2}\right), \quad (2)$$

где  $R_q = R_a \cdot \sqrt{\pi/2}$  [2];

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  
 $h$  – высота неровностей профиля.

В реальном трибосопряжении обе контактирующие поверхности являются шероховатыми. Для учета микрогеометрии обеих поверхностей в выражении (2) используются приведенные характеристики [3]:

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}. \quad (3)$$

Индексами 1 и 2 отмечены параметры шероховатости соответствующих поверхностей.

При моделировании локальных дефектов поверхностей необходимо задавать не только ряд их размерных параметров, но и виды профилей. Для описания профилей локальных дефектов (лунки, раковины, риски, трещины и т.п.) предложены функции  $D(x)$  на базе полиномов Чебышева и Баттерворта:

$$D(x) = D_{\max} / \sqrt{[m_{\bar{a}} \cdot (x - x')]^s + 1}; \quad (4)$$

$$D(x) = D_{\max} / \sqrt{\varepsilon^2 \cdot T_n^s \cdot m_{\bar{a}} \cdot (x - x')},$$

где  $s, \varepsilon$  – коэффициенты, задающие профиль дефекта;  
 $D_{\max}, m_{\bar{a}}, x'$  – соответственно, параметры глубины, протяженности и смещения дефекта;  
 $T_n(x)$  – полином Чебышева степени  $n$  с аргументом  $m_{\bar{a}}(x - x')$ .

Обоснование выбора данных функций подробно рассмотрено в [12]. Отметим, что они обеспечивают возможность моделирования различных по глубине, протяженности и характеру рельефа дефектов путем задания соответствующих значений параметров.

**Основные схемы контактирования поверхностей и математическое описание их сопротивления**

Детали трибосопряжения могут иметь различную форму, определяющуюся назначением трибосопряжения и функциями механизма, составной частью которого оно является. Форма поверхностей деталей трибосопряжений в области контакта имеет определяющее значение при математическом описании процессов, происходящих в зонах трения. Несмотря на многообразие видов конструкций трибообъектов, существуют несколько основных схем контактирования поверхностей, охватывающих большую часть стандартных и унифицированных элементов, выполняющих в машинах и механизмах функции трибосопряжений [8, 9]. Сведения об основных схемах контактирования поверхностей деталей трибообъектов приведены в сводной расчетной таблице 1.

Согласно теории контактных деформаций Герца, сближение  $\delta$  контактирующих гладких поверхностей определяется по формуле [8]:

$$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\Sigma\rho}; \quad a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1 - \eta^2}{E}\right)^2 \cdot F_r^2}, \quad (5)$$

где  $E$  и  $\eta$  – соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона;  
 $F_r$  – нормальная нагрузка в контакте;  
 $(2K/\pi a)$  – табличный коэффициент;  
 $\Sigma\rho$  – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей, определяемая по радиусам кривизны поверхностей (таблица 1).

Путем подстановки расчетных формул для  $\Sigma\rho$  в выражение (5) получены зависимости для расчета сближения  $\delta$  (приведены в таблице 1).

Для моделирования влияния высоты микронеровностей поверхностей на фактическую площадь контакта использована модель Гринвуда – Вильямсона. [9]. Данная модель является математическим описанием механических процессов, возникающих при контактировании двух шероховатых поверхностей. Ее особенность заключается в использовании методов теории вероятностей для расчета контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

Согласно модели Гринвуда – Вильямсона, использование данной функции позволяет оценить число неровностей, вступивших в контакт, то есть, число вероятных контактов  $n$ :

$$n = N \cdot \int_d f(h) \cdot dh, \quad (6)$$

где  $N$  – число всех неровностей, находящихся в пределах  $A_d$  двух поверхностей;  
 $d$  – номинальный зазор между поверхностями.

Зазор  $d$  является функцией высоты неровностей и может быть определен из выражения [9]:

$$d = R_p - \delta, \quad (7)$$

где  $R_p$  – приведенная высота сглаживания неровностей профиля поверхностей ( $R_p = R_{p1} + R_{p2}$ ).

Число  $N$  может быть найдено из выражения [1]:

$$N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}, \quad (8)$$

где  $A_c$  – контурная площадь контакта поверхностей;  $S_{m1}, S_{m2}$  – средний шаг неровностей профиля в двух перпендикулярных сечениях (продольном и поперечном).

Согласно теории упругого контактирования поверхностей, контурная площадь  $A_c$  в общем случае определяется из выражения:

$$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \sum \rho}\right)^2} - A_D, \quad (9)$$

где  $A_D$  – площадь локального дефекта.

Подставляя в формулу (6) выражение (2) и проводя интегрирование, получаем:

$$n = N \cdot \left[ \frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right], \quad (10)$$

где  $L(d/R_q)$  – функция Лапласа (табулирована).

По модели Гринвуда – Вильямсона ФПК равна [9]:

$$A_r = \pi \cdot \beta \cdot N \cdot \int_d^\infty (h-d) \cdot f(h) dh, \quad (11)$$

где  $\beta$  – радиус закругления единичной неровности;

$\delta$  – сближение поверхностей ( $\delta = h - d$ ).

Подставляя в формулу (11) выражение (2) и проводя интегрирование, получаем:

$$A_r = a_r \cdot \Psi_A(h), \quad (12)$$

где  $a_r$  – значение ФПК при контактировании двух поверхностей по средним линиям профиля;

$\Psi_A(h)$  – параметр, учитывающий зависимость ФПК от  $h$  и  $R_q$  поверхностей:

$$a_r = \pi \cdot N \cdot \beta \cdot d;$$

$$\Psi_A(h) = L\left(\frac{d}{R_q}\right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{2}, \quad (13)$$

Радиус  $\beta$  можно вычислить по формуле [6]:

$$\beta = \sqrt{r_{пр} \cdot r_{поп}}, \quad (14)$$

где  $r_{пр}, r_{поп}$  – соответственно, радиусы закругления вершин неровностей в продольном и поперечном направлениях (параметры шероховатости).

Рассмотрим фрикционный контакт двух поверхностей. Принимая электрическое сопротивление фрик-

ционного контакта  $R$  за сопротивление стягивания (граничная смазка) по теории Хольма имеем [2]:

$$R_{ст} = \frac{\rho_m}{2 \cdot n \cdot r_k}, \quad (15)$$

где  $\rho_m$  – удельное сопротивление материалов контакта;  $r_k$  – радиус пятна металлического контакта.

Проведем последовательные математические преобразования выражения (14):

$$R_{ст}^2 = \frac{\rho_m^2}{4 \cdot n^2 \cdot r_k^2} = \frac{\pi \cdot \rho_m^2}{4 \cdot \pi \cdot n^2 \cdot r_k^2} = \frac{\pi \cdot \rho_m^2}{4 \cdot A_r \cdot n}; \quad (16)$$

Следовательно, сопротивление стягивания:

$$R_{ст} = \frac{\rho_m \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{A_r} \cdot n}. \quad (17)$$

С учетом выражений (10) и (12), после математических преобразований получаем:

$$R_{ст} = a_R \cdot \Psi_R(h), \quad (18)$$

где  $a_R$  – значение  $R$  при контактировании двух поверхностей по средним линиям профиля;  $\Psi_R(h)$  – параметр, учитывающий зависимость  $R$  от  $h$  и  $R_q$  поверхностей:

$$a_R = \frac{\rho_m}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta \cdot d}};$$

$$\Psi_R(h) = \left[ L\left(\frac{d}{R_q}\right) \cdot \left[ 1 - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{4} \right]^{-0,5}. \quad (19)$$

Выражение (18) с учетом зависимостей (5), (8), (9) и (19) позволяет получить математическое описание  $R$  для любой из приведенных в таблице 1 схем контактирования поверхностей. Зависимости для расчета коэффициентов  $a_r$  и  $a_R$  для типовых схем контактирования, представлены в таблице 1.

#### Обобщенная методика моделирования электрического сопротивления трибообъекта

На основе предложенного обобщенного подхода, проведенных выше рассуждений и полученных аналитических выражений предлагается следующая обобщенная методика моделирования электрического сопротивления трибообъектов:

1) Анализ объекта моделирования, выявление входящих в него фрикционных контактов, установление электрических связей между ними, составление электрической схемы замещения трибообъекта.

2) Составление математической модели электрического сопротивления для каждого из фрикционных контактов:

– составление математического описания каждой из контактирующих поверхностей, характеризующего номинальную геометрию, отклонения от правильной геометрической формы и расположения поверхно-

стей согласно (1), характеристики локальных дефектов согласно (4); задание числовых значений параметров  $R_{пов0}$ ,  $Q_k$ ,  $\varphi_k$ ,  $s$ ,  $\varepsilon$ ,  $D_{max}$ ,  $m_d$  и  $x$ ;

– задание параметров, характеризующих свойства конструкционных материалов  $E$ ,  $\eta$ ,  $\rho_M$ ;

– задание режимов работы трибосопряжения, в частности, значения нагрузки  $F_r$  в контакте (если известна нагрузка на трибообъект, то необходимо предварительно решить задачу о распределении нагрузки между фрикционными контактами);

– задание вида дифференциальной функции распределения высоты микронеровностей контактирующих поверхностей (2); задание параметров шероховатости каждой из контактирующих поверхностей ( $R_{q1}$ ,  $R_{q2}$ ,  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $r_{пр}$ ,  $r_{пон}$ ,  $S_{m1}$ ,  $S_{m2}$ ) и вычисление по (3) эквивалентных параметров ( $R_q$ ,  $R_p$ );

– выбор вида схемы контактирования поверхностей, соответствующей моделируемому фрикционному контакту, и определение по таблице 1 соответствующей расчетной формулы для сближения  $\delta$ , фактической площади контакта  $A_r$ , и сопротивления  $R_{ст}$ , предварительно определив контурную площадь  $A_c$  из (9), число вероятных контактов  $N$  из (8).

3) Составление математической модели электрического сопротивления трибообъекта на базе математических моделей отдельных фрикционных контактов и выявленных при построении схемы замещения электрических связей между ними.

Предложенный обобщенный подход и полученные для типовых схем контактирования поверхностей аналитические выражения по расчету отдельных факторов и параметров, влияющих на электрическое сопротивление фрикционного контакта, позволяют в каждом конкретном случае для исследуемого трибообъекта, работающего в условиях граничной смазки, получить математические модели электрического сопротивления каждого из входящих в объект фрикционного контакта с последующим построением математической модели электрического сопротивления объекта в целом. Получаемая таким образом модель учитывает конструктивные параметры объекта (номинальные размерные параметры деталей, свойства конструкционных материалов, шероховатость, отклонения от правильной геометрической формы и расположения рабочих поверхностей, их локальные дефекты), а также режимы его эксплуатации.

#### Краткие выводы

1 Предложенный в работе обобщенный подход к моделированию электрического сопротивления трибообъектов обеспечивает возможность создания математических моделей различных узлов трения, необходимых для проведения теоретических исследований по разработке методов и средств испытаний, диагностирования, контроля и прогнозирования технического состояния трибообъектов и учитывающих комплекс параметров объекта, включая шероховатость, отклонения формы и расположения поверхностей, параметры локальных дефектов, и режимы его работы.

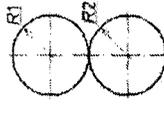
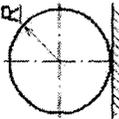
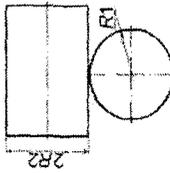
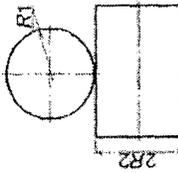
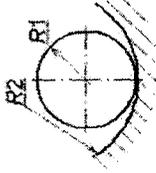
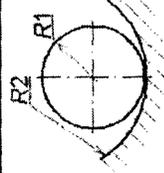
2 Основу обобщенного подхода к моделированию различных видов трибообъектов составляют разработанные методика моделирования и базовые модели сопротивления элементарных фрикционных контактов.

Работа выполнена в соответствии с грантом МК-3824.2005.8.

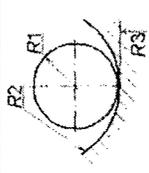
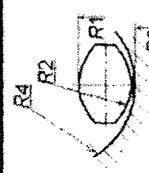
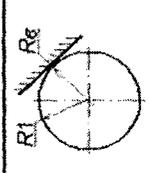
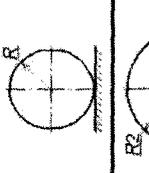
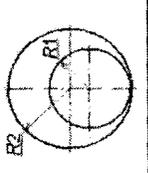
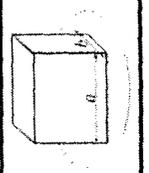
#### Литература:

- 1 Подмастерьев, К.В. *Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения* [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
- 2 Кончиц, В.В. *Триботехника электрических контактов* [Текст] / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.
- 3 Демкин, Н.Б. *Теория контакта реальных поверхностей и трибология* [Текст] / Н.Б. Демкин // *Трение и износ.* – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
- 4 Подмастерьев, К.В. *Математическая модель диагностического параметра электрического сопротивления* / К.В. Подмастерьев, С.В. Баранников // *Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение.* – Орел: ОрелГТУ, 2000. – № 4. – С. 150-154.
- 5 Мышкин, Н.К. *Контакт шероховатых тел и его проводимость* [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. / Н.К. Мышкин // *Трение и износ.* – 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.
- 6 Рыжов, Э.В. *Контактная жесткость деталей машин* [Текст] / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 194 с.
- 7 Мишин, В.В. *Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения*: Дисс. канд. техн. наук [Текст] / В.В. Мишин. – Орел: 2000. – 265 с.
- 8 Ковалев, М.П. *Расчет высокоточных шарикоподшипников* [Текст] / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкый // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.
- 9 Мышкин, Н.К. *Трибология. Принципы и приложения* [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
- 10 Демкин, Н.Б. *Качество поверхности и контакт деталей машин* [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
- 11 Линник, Ю.В. *Математико-статистическое описание неровности профиля поверхности при шлифовании* [Текст] / Ю.В. Линник, А.П. Хусу. // *Инж. сб. АН СССР.* – №20. – 1954.
- 12 Пахолкин, Е.В. *Моделирование и теоретическое исследование влияния локальных дефектов рабочих поверхностей трибосопряжения на состояние смазочного слоя в зоне трения (на примере подшипника качения)* [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // *Известия ОрелГТУ.* – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – № 3. – С. 71-74.
- 13 *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.
- 14 Марков, В.В. *Контроль подшипников качения по параметрам электрического сопротивления* [Текст] / В.В. Марков, В.В. Мишин // *Контроль. Диагностика,* 2004. – № 9. – С. 35-41.

Таблица 1 – Основные схемы контактирования поверхностей и их характеристики

№	Характеристики типовых схем контактирования				Расчетные зависимости			
	Название	Схема	Объекты	$\Sigma\rho$	$\delta$	$a_r$	$a_R$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Два шара радиусами $R_1$ и $R_2$		Машины трения	$\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_2} + \frac{2}{R_1}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_2} + \frac{2}{R_1}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_2} + \frac{2}{R_1}} \right)^{-0.5}$	
2	Шар радиусом $R$ и плоскость		Машины трения, контакты скользящих токосъемных устройств	$\frac{2}{R}$	$a \sqrt{\frac{2}{R}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R}} \right)^{-0.5}$	
3	Два цилиндра радиусами $R_1$ и $R_2$ , $R_1 > R_2$		Машины трения, валки прокатного стана	$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)^{-0.5}$	
4	Шар радиусом $R_1$ и цилиндр радиусом $R_2$ , $R_2 < R_1$		Машины трения, шаровые опоры	$\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)^{-0.5}$	
5	Шар радиусом $R_1$ и цилиндрический желоб радиусом $R_2$ , $R_1 > R_2$		Машины трения	$\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right)^{-0.5}$	
6	Шар радиусом $R_1$ и вогнутая шаровая поверхность радиусом $R_2$ , $R_2 > R_1$		Машины трения	$\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}}$	$\pi N \cdot \beta \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_p - a \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}} \right)^{-0.5}$	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
7	Шар радиусом $R_1$ и поверхность вращения радиусами $R_2$ и $R_3$ , $R_2 > R_1$		Шариковые подшипники качения (для внутреннего кольца $R_3 > 0$ , для наружного кольца $R_3 < 0$ )	Если $R_3 > 0$ : $\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3}}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot H \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3}} \right)^{-0.5}$
8	Поверхность вращения радиусами $R_1, R_2$ и $R_3, R_4, R_2 > R_1, R_4 > R_3$		Машины трения	$\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3} \frac{1}{R_4}$	$a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3} \frac{1}{R_4}}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3} \frac{1}{R_4}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot H \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2} \frac{1}{R_3} \frac{1}{R_4}} \right)^{-0.5}$
9	Шар радиусом $R_1$ и внутренняя коническая поверхность радиусом $R_2$ в области касания		Машины трения	$\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2}}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot H \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{2}{R_1} \frac{1}{R_2}} \right)^{-0.5}$
10	Ролик радиусом $R$ и плоскость		Машины трения, шрифтовальное оборудование	$\frac{1}{R}$	$a \sqrt{\frac{1}{R}}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R}} \right)^{-0.5}$
11	Два ролика радиусами $R_1$ и $R_2$		Машины трения, подшипники скольжения, роликовые подшипники качения	$\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2}$	$a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2}}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{1}{R_2}} \right)^{-0.5}$
12	Плоскость размерами $(a, b)$ и плоскость		Направляющие	0	$\frac{6 \cdot \pi}{A_0}$	$\pi \cdot N \cdot \beta \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{6 \cdot \pi}{A_0}} \right)$	$\frac{\rho_{H_1}}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}} \times \left( R_f - a \sqrt{\frac{6 \cdot \pi}{A_0}} \right)^{-0.5}$

## ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.511.4

Канд. техн. наук Косчинский С.Л.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: [dynamics@ostu.ru](mailto:dynamics@ostu.ru)

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*The paper deals with control and performance analysis of high-voltage series resonant converter. The effect of static instability of this system is analyzed in detail. In order to solve instability problem new algorithm with implicit control of series LC-tank stored energy is proposed in paper. The performance of proposed control algorithm is compared with classical one in both static control-to-output transfer function and voltage and current stresses of converter elements.*

### Введение

Эффект электрического резонанса широко используется в современных импульсных системах преобразования электрической энергии, называемых «резонансные преобразователи». Принцип функционирования подобных систем заключается в возбуждении электрических колебаний в колебательном контуре путем воздействия на него последовательностью прямоугольных импульсов и преобразования вынужденных колебаний для получения энергии нагрузки с заданными характеристиками [1-4]. Мотивацией создания резонансных преобразователей напряжения (РПН) служит стремление снизить уровень высокочастотных помех в выходном напряжении, обусловленных коммутацией силовых полупроводниковых приборов преобразователя за счет существенного снижения скорости изменения коммутируемых величин. Очевидно, что синусоидальные колебания, используемые при преобразовании энергии в резонансной системе, характеризуются значительно более низкими значениями  $di/dt$  и (или)  $dv/dt$  по сравнению с аналогичными прямоугольными колебаниями токов (напряжений) в классических преобразователях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Основным недостатком РПН, препятствующим повсеместному замещению ими систем с ШИМ, является относительно низкий уровень их удельной энергетической эффективности, определяемой как отношение значения преобразуемой энергии к массогабаритным (стоимостным) показателям преобразователя. Однако, известен ряд приложений импульсных систем преобразования энергии, для которых преимущества резонансного преобразования энергии является определяющим фактором при выборе преобразователя. В первую очередь, это относится к высоковольтным преобразователям энергии [1-2]. Для них качество выходной энергии, обусловленное требованиями изоляции и самого технологического процесса (например, формирование питания рентгеновских трубок), является приоритетом.

Основным способом регулирования параметров выходной энергии РПН является частотное регулирование (pulse-density modulation (PDM)) [1-4], при кото-

ром за счет увеличения (уменьшения) частоты следования [1] импульсов, возбуждающих колебательный контур, соответственно увеличивается (уменьшается) величина преобразуемой энергии. Замкнутые системы преобразования энергии на базе резонансных преобразователей, как правило, формируют сигнал управления заданной частоты в соответствии с релейным способом регулирования [2,4], использование которого обусловлено отсутствием методологии проектирования регуляторов указанных систем. Невозможность использования при проектировании РПН хорошо разработанного для систем с ШИМ аппарата теории усреднения вызвано сложным характером процессов, протекающих в резонансных преобразователях (быстрые изменения переменных состояния в LC-контуре и относительно медленные – во входных и выходных цепях). Кроме того, статические характеристики РПН не монотонные [1], что затрудняет построение замкнутых систем на их основе.

В работе предложен новый способ управления РПН, гарантирующий его монотонную статическую регулировочную характеристику. Эффективность данного способа управления оценивается по результатам моделирования в сопоставлении с классическим способом.

### Схема замещения и математическая модель резонансного преобразователя напряжения

Схема замещения РПН приведена на рис.1, а. Классический алгоритм управления для схемы рис.1, а проиллюстрирован временными диаграммами рис.1, б. В схеме замещения присутствует гальваническая связь между входными и выходными цепями преобразователя. При этом в сопоставлении с реальным устройством, как правило, содержащем изолирующий повышающий трансформатор, элементы  $R$  и  $C_o$  и переменная  $u_o$  схемы замещения рис.1, а должны рассматриваться, как пересчитанные в первичную цепь трансформатора соответствующие величины.

Математическая модель резонансного преобразователя напряжения, соответствующая схеме замещения рис.1, имеет вид:

$$L \frac{di_L}{dt} = -ri_L - u_C - \text{sign}(i_L) u_o + U_{ZY};$$

$$C \frac{du_C}{dt} = i_L; C_o \frac{du_o}{dt} = |i_L| - \frac{1}{R} u_o \quad (1)$$

Здесь  $i_L$ ,  $u_C$ ,  $u_o$  есть переменные состояния системы;  $U_{ZY}$  – выходное напряжение управляемого инвертора VT1-VT4, определяемое в соответствии с алгоритмом рис.1, б или рис.1, в; функция  $sign(i_L)$  принимает значения +1 и -1, в зависимости от знака

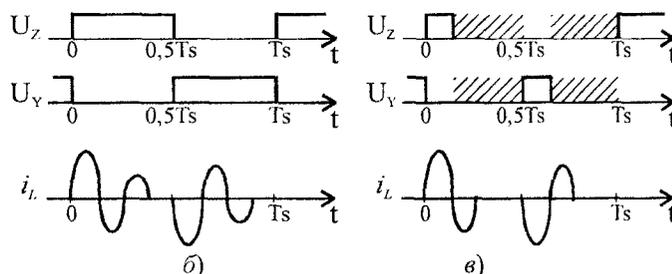
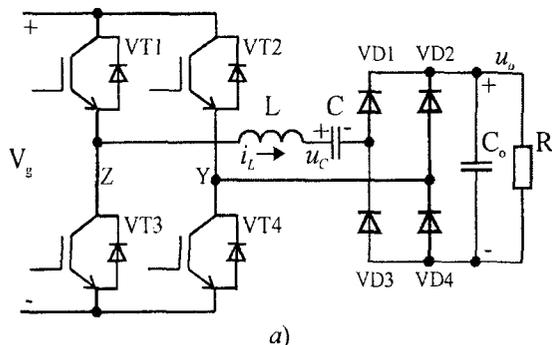


Рис.1. Схема замещения РПН (а); временные диаграммы, поясняющие классический (б) и предлагаемый (в) алгоритмы управления преобразователем

Модель (1) существенно нелинейная. Ее правая часть разрывается в моменты времени изменения напряжения  $U_{ZY}$  и при перемене знака тока  $i_L$  в колебательном контуре. Решение модели (1) удобно выполнять методом припасовывания, определяя частные решения (1) на интервалах постоянства структуры схемы замещения и «сшивая» полученные частные решения на границах соответствующих интервалов.

**Результаты моделирования**

Результаты моделирования системы (1) с алгоритмом управления рис.1, б систематизированы на рис. 2 в виде семейства регулировочных характеристик (показанных сплошными линиями) для различных значений нагрузки  $R$  преобразователя (см. также, полученные приближенно диаграммы в [1]). По осям рис. 2 отложены относительное значение частоты управления инвертором VT1-VT4 и относительное значение выходного напряжения  $M = \langle u_o \rangle / V_g$ , соответственно. В качестве нормирующих величин для частоты и сопротивления на диаграмме рис. 2 использованы резонансная частота  $f_0$  и волновое сопротивление  $R_0$  колебательного контура.

Из диаграмм рис. 2 следует, что для значений эквивалентного сопротивления нагрузки, соизмеримых с волновым сопротивлением контура, имеется возможность регулировать выходное напряжение, изменяя частоту управления  $f_s$  вниз от резонансной частоты  $f_0$  [1-4]. Из рис. 2 очевидно, что регулировочная характеристика РПН имеет четко выраженный максимум на резонансной частоте и ее нечетных субгармониках (см., например, кривую для  $R/R_0=0,5$  [1]). Это явление обуславливает образование на регулировочной характеристике участков с отрицательным сопротивлением (участок АВ на кривой  $R/R_0=0,5$  рис. 2), характеризующихся статической неустойчивостью преобразователя. Практическая реализация замкнутой системы РПН возможна для значений час-

аргумента;  $r$  – эквивалентное сопротивление потерь колебательного контура и управляемого инвертора VT1-VT4;  $R$  – приведенное сопротивление нагрузки.

При моделировании в работе использованы параметры схемы замещения, соответствующие 10 кВт, 60 кВ резонансному преобразователю напряжения:  $L=54$  мкГн;  $C=1,6$  мкФ;  $r=0,05$  Ом;  $C_o=36$  мкФ;  $V_g = 540$  В.

тоты расположенных правее точки В соответствующей регулировочной характеристики. Для типичного случая нестационарной нагрузки определение диапазона регулирования предполагает проведение анализа семейства регулировочных характеристик, полученных теоретически или экспериментально.

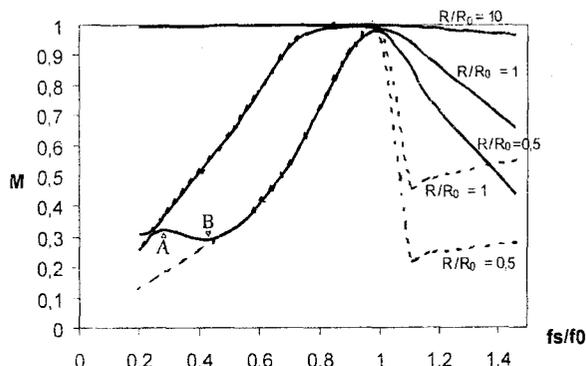


Рис.2. Семейство статических регулировочных характеристик РПН для различных значений нагрузки

Решение проблемы статической неустойчивости РПН возможно за счет изменения алгоритма управления, обеспечивающего возможность явного или косвенного контроля энергии, запасенной в контуре. Предлагаемый алгоритм управления проиллюстрирован на рис.1, в. Штриховкой на рис.1, б показано неопределенное состояние плеча инвертора, при котором оба транзистора находятся в непроводящем состоянии. Переход плеча инвертора в непроводящее состояние производится в момент перехода через ноль тока дросселя  $i_L$ . При подобном управлении дальнейшие колебания в контуре возможны только с диссипацией энергии через диоды обратного хода инвертора VT1-VT4. Указанная особенность управления не влияет на преобразование энергии в окрестности основного резонанса  $f_0$ , однако оно нарушает условия

возникновения субгармонических резонансов в системе. Регулировочные характеристики для РПН рис.1, а с управлением в соответствии с алгоритмом рис.1, в показаны пунктиром на рис. 2 для различных значений нагрузки. Исчезновение участка регулировочной характеристики с отрицательным наклоном очевидно.

Использование предлагаемого алгоритма управления не увеличивает перегрузочную способность элементов РПН по сравнению с классическим алгоритмом. На рис. 3 приведены семейства нормированных характеристик, описывающие необходимую перегрузочную способность по току и напряжению элементов РПН для различных значений нагрузки.

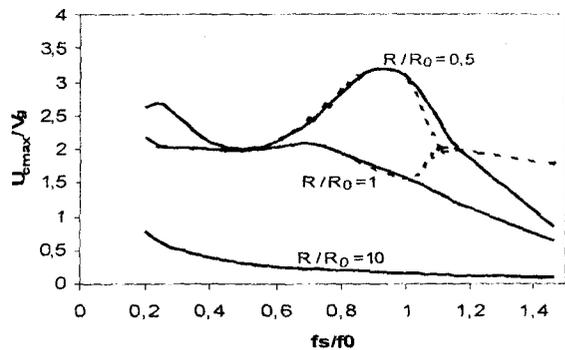
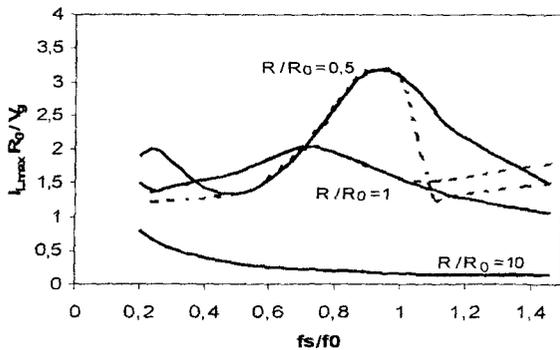


Рис.3. Относительная перегрузка элементов РПН при частотном управлении и различных значениях нагрузки

**Заключение**

В работе разработана математическая модель и приведены результаты моделирования высоковольтного РПН. Изучено явление статической неустойчивости, обусловленное наличием участка с отрицательным наклоном на регулировочной характеристике, который в свою очередь является следствием явления субгармонического резонанса в преобразователе. Нарушение условий статической неустойчивости РПН возможно путем усложнения его алгоритма управления, обеспечивающего контроль над запасенной энергией в колебательном контуре. Предложенный в работе алгоритм управления РПН гарантирует монотонность его регулировочной характеристики и на его основе существенно расширяет диапазон регулирования параметров замкнутых систем.

**Литература:**

- 1 Witulski A.F., Erickson R.W. Steady-state analysis of the series resonant converter. // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – Vol. 21. – № 6, 1985. – PP. 791-799.
- 2 Fujita H., Akagi H. Control and performance of a pulse-density-modulated series resonant inverter for corona discharge processes // IEEE Trans. Industry Applicat. – Vol. 35. – № 3, 1999. – PP. 621-627.
- 3 Цанков Д.Т., Банков Н.Д., Табаков С.Е. Метод регулирования мощности в резонансных преобразователях электрической энергии. // Электротехника. – № 11, 1997. – С. 60-63.
- 4 Павлов Г.В., Покровский М.В., Обрубов А.В. Релейное управление последовательным резонансным преобразователем. // Техническая электродинамика, темат. выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – Ч.2, 2003. – С.72-77.

УДК 004.421:621.314.1

Кузьмин А.С., Кудинов Г.В., канд. техн. наук Шолоник А.П.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: sholonik@yandex.ru

**ИНТЕРАКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

In the article the investigation of a complex dynamic system with the help of interactive computer algorithm is observed using the example of buck converter. The structure of algorithm is given. The advantages of the new algorithm are considered.

**Введение**

Широкое распространение импульсных систем преобразования электроэнергии (ИСПЭ) и импульсных преобразователей постоянного напряжения (ППН), как их характерных представителей, обусловлено рядом преимуществ, заключающихся в малых габаритах и массе, высоком КПД [1,2]. При этом ППН обладают сложной динамикой, требующей эффективных инструментов исследования [3,4].

словлено рядом преимуществ, заключающихся в малых габаритах и массе, высоком КПД [1,2]. При этом ППН обладают сложной динамикой, требующей эффективных инструментов исследования [3,4].

Как правило, наибольший интерес при исследовании динамики представляет определение областей существования субгармонических режимов с различными периодами в пространстве параметров ППН. Следует отметить, что существенно нелинейный характер ППН, описываемых системами дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями, требует при исследовании использования численных методов, реализация которых на ЭВМ особенно эффективна. Одним из наиболее эффективных инструментов исследования в данном случае является двухпараметрическая бифуркационная диаграмма.

В настоящее время известны автоматические алгоритмы построения двухпараметрических диаграмм, реализующие непрерывное последовательное сканирование области пространства параметров и использующие автоматическое определение периода субгармонического режима, существующего в системе в каждой из точек исследуемой области. Недостатками алгоритмов являются невозможность определения единственности обнаруженных динамических режимов и существенные затраты машинного времени на последовательное сканирование всей области.

Предлагаемый в работе автоматизированный алгоритм, также основанный на построении двухпараметрических диаграмм и автоматической идентификации динамических режимов, в значительной степени свободен от указанных недостатков, что достигается наличием в нем элементов интерактивного взаимодействия с человеком (исследователем), управляющим процессом сканирования пространства параметров.

### Математическая модель ППН

Описание алгоритма целесообразно провести на примере его реализации для исследования динамики ППН с ШИМ-2. Схема замещения понижающего ППН приведена на рис. 1.

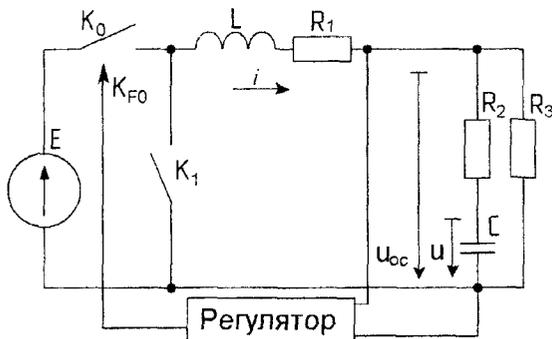


Рис. 1. Схема замещения понижающего ППН

Математическая модель силовой части ППН, полученная на базе модели, приведенной в [4], имеет вид:

$$\frac{dX(\gamma)}{d\gamma} = T \cdot A \cdot X(\gamma) + T \cdot B \cdot K_{F0}, \quad (1)$$

где  $X(\gamma) = \begin{pmatrix} i(\gamma) \\ u(\gamma) \end{pmatrix}$  – вектор переменных состояния;

$i(\gamma)$  – ток, протекающий через дроссель;

$u(\gamma)$  – напряжение на конденсаторе;

$\gamma \in [0, 1]$  – относительное время на периоде регулирования;

$T$  – длительность периода регулирования;

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L} \left( R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \right) & -\frac{R_3}{L \cdot (R_2 + R_3)} \\ \frac{R_3}{C \cdot (R_2 + R_3)} & \frac{1}{C \cdot (R_2 + R_3)} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} E \\ L \\ 0 \end{pmatrix}$$

соответственно, квадратная матрица и вектор-столбец, описывающие параметры силовой части ППН.

Регулятор реализует одноканальную ШИМ-2 с модуляцией заднего фронта, пропорциональный закон регулирования. Регулирование осуществляется по выходному напряжению.

Значение функции  $K_{F0}$  вычисляется по алгоритму:

$$K_{F0} = \begin{cases} 1, & 0 < \gamma \leq \gamma_0; \\ 0, & \gamma_0 < \gamma < 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\gamma_0$  – момент коммутации, соответствующий переходу ключа  $K_0$  в непроводящее состояние, ключа  $K_1$  – в проводящее.

Значение  $\gamma_0 \in [0, 1]$  определяется, как наименьший корень уравнения коммутации:

$$\zeta_0(X(\gamma), \gamma) = \alpha \cdot (U_y - \beta \cdot C_0 \cdot X(\gamma)) - U_y \cdot \gamma = 0, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи П-звена регулятора;

$\beta$  – коэффициент передачи делителя выходного напряжения;

$U_y$  – напряжение уставки;

$U_0$  – амплитуда пилообразного напряжения;

$$C_0 = \begin{pmatrix} \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} & \frac{R_3}{R_2 + R_3} \end{pmatrix}$$
 – вектор-строка, уста-

навливающая соответствие между  $X(\gamma)$  и напряжением на входе регулятора ( $u_{oc}$ ).

В соответствии с определенной выше математической моделью с синхронным выпрямителем (МСВ) (1-3), в зависимости от состояния ключей  $K_0$  и  $K_1$  силовая часть ППН может находиться в одном из двух состояний, для которых ее математическая модель (1) приобретает вид системы дифференциальных уравнений с гладкими правыми частями:

а) ключ  $K_0$  находится в проводящем состоянии,  $K_1$  – в непроводящем:

$$\frac{dX(\gamma)}{d\gamma} = T \cdot A \cdot X(\gamma) + T \cdot B;$$

б) ключ  $K_0$  находится в непроводящем состоянии,  $K_1$  – в проводящем:

$$\frac{dX(\gamma)}{d\gamma} = T \cdot A \cdot X(\gamma)$$

Решение данной модели в переменных состояния может быть получено в виде точечного отображения (отображения Пуанкаре):

$$X_{K+1} = F(X_K), \quad (4)$$

ставящего в соответствие вектору переменных состояния на начале периода регулирования  $X_K$  вектор в конце периода регулирования  $X_{K+1}$ .

**Описание интерактивного алгоритма исследования динамики**

В качестве варьируемых параметров в алгоритме используются сопротивление нагрузки  $R_3$  и коэффициент передачи по постоянной составляющей  $\alpha$ .

Этапы алгоритма:

- 1 Устанавливаются параметры –  $\alpha$  и  $R_3$ .
- 2 В цикле вычисляется вектор-столбец  $X$ . После выполнения установленного количества итераций вида (4), необходимых для завершения переходного процесса, полученное значение  $X$  запоминается.
- 3 Производится определение периода режима работы путём сравнения запомненного  $X$  со значениями, полученными в результате следующих итераций. При совпадении определяется период, и на экран выводится точка с координатами  $(\alpha, R_3)$  цветом, определенным заранее для каждого периода.

4 Проверяется наличие запроса от исследователя на выполнение действий. Если запроса нет – перейти к п. 5, если есть – продолжить.

4.1 Запрос на изменение направления или переменной сканирования? Если да, выполнить запрашиваемое. Если нет – продолжить. В результате выполнения действия при продолжении построения может быть обнаружены режимы с периодом, отличным от ранее полученных и существующих параллельно с ними.

4.2 Запрос на останов сканирования? Если да, выполнить запрашиваемое. Если нет – продолжить.

4.3 Запрос на рандомизацию начальных условий при поиске режима в данной точке пространства параметров. Да – задать новый вектор-столбец  $X$ . Нет – продолжить. При выполнении действия в рассматриваемой точке и далее при построении могут обнаружиться режимы с периодами, отличными от ранее полученных.

4.4 Запрос на построение сечения Пуанкаре? Да – построить сечение Пуанкаре в отдельной области экрана. Нет – продолжить.

4.5 Запрос на перемещение в другую точку исследуемой области пространства параметров? Да – выполнить запрашиваемое. Нет – продолжить. Выполнение действия позволяет быстро переместиться в желаемую точку диаграммы и продолжить построение из нее, не дожидаясь перехода в эту точку при последовательном сканировании пространства параметров.

5 Происходит переход к шагу 1 для установления следующих значений параметров  $\alpha$  и  $R_3$ .

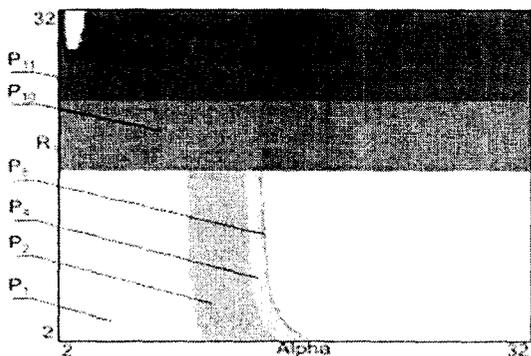


Рис.2. Двухпараметрическая диаграмма при сканировании «справа налево, сверху вниз»

Преимущества алгоритма можно оценить при сравнении двух диаграмм, полученных в результате сканирования пространства параметров в разных направлениях. На рис. 2. изображена диаграмма, полученная в результате сканирования справа налево с изменением  $\alpha$  от максимального заданного значения до минимального, сверху вниз с изменением сопротивления  $R_3$  также от максимального до минимального. Области существования субгармонических режимов обозначены символом  $P$  с индексами, соответствующими периодичности режима.

На рис. 3 приведена диаграмма, полученная сканированием снизу вверх с изменением  $R_3$  от минимального до максимального, слева направо с изменением  $\alpha$  от минимального до максимального.

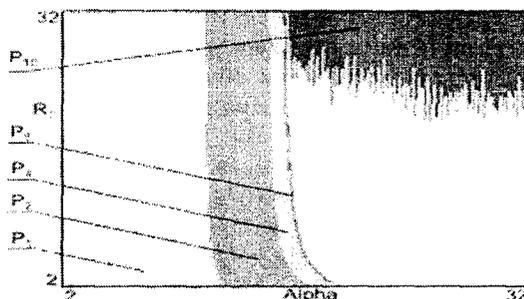


Рис. 3. Двухпараметрическая диаграмма при сканировании «снизу вверх, слева направо»

В результате применения предлагаемого алгоритма сопоставлением диаграмм удалось обнаружить существование режимов с периодами 1, 2, 4 и 8 в левой верхней четверти сканируемой области параллельно с режимами периодичностью 10 и 11.

**Выводы**

Предложенный авторами интерактивный алгоритм является развитием одного из эффективных методов исследования динамики существенно нелинейных систем на базе двухпараметрических бифуркационных диаграмм. Предложенные в данной работе элементы интерактивного взаимодействия могут быть изменены или дополнены (например, построением по запросу спектра Фурье или определением мультипликаторов периодических режимов). Конкретный вариант его реализации в значительной степени определяется особенностями ИСПЭ и методами, используемыми различными исследователями.

**Литература:**

- 1 Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- 2 Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 3 M. Di Bernardo, E. Fossas, G. Olivar, F. Vasca, "Secondary Bifurcations And High Periodic Orbits In Voltage Controlled Buck Converter", International Journal Of Bifurcation And Chaos. – Vol. 7. – № 12, 1997.
- 4 Колоколов Ю.В., Косчинский С.Л., Шолоник А.П. Динамика импульсного понижающего преобразователя напряжения в режиме прерывистых токов - Электричество. – № 9, – 2003. – С. 40-53.

УДК 621.83

Канд. техн. наук, доц. Шалобаев Е.В., асс. Моныхов Ю.С.

(Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики)

Россия, г. Санкт-Петербург, тел. (812)2335952; shalobaev47@mail.ru

Докт. техн. наук, ст. науч. сотр. Старжинский В.Е.

(Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси)

Беларусь, г. Гомель, тел (232)774846

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СООСНЫХ РЕДУКТОРОВ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

*The problem of efficient choice of kinematics parameters – of stage number and total gear ratio distribution – is considered for multistage toothed mechanisms. Various arrangement schemes of multistage toothed mechanisms – ledge wise, coaxial and orbital – are examined. Results of optimizing calculations are described. As an example of real coaxial reducer parameters in comparison with other arrangements schemes is given.*

### Введение

Одной из проблем проектирования мехатронных систем является различная плотность использования объема изделия механическими и электронными компонентами, из-за чего возникает потребность в разработке компактных конструкций. Это является первым этапом миниатюризации конструкции механической компоненты мехатронных систем. Известно, что наилучшее заполнение объема таких систем обеспечивают прециссирующие, планетарные, волновые и соосные передачи [1, 2].

Особую группу составляют слабо исследованные многоступенчатые рядовые соосные зубчатые механизмы. Соосными, по определению, называют механизмы, у которых геометрическая ось совпадает с осями звеньев, подводящих и отводящих крутящие моменты. Специфическая кинематическая схема такого типа приводов обуславливает необходимость разработки соответствующих оптимизированных схем компоновки, в частности, оптимизации по габаритам.

### Основная часть

Рассмотрим задачу оптимизации объема для соосных передач [3]. На рис.1 представлена схема многоступенчатого рядового соосного механизма. Очевидно, что при одинаковом межосевом расстоянии такого редуктора передаточное отношение каждой ступени может изменяться в пределах, определяемых величиной модуля, суммой чисел зубьев в паре колес данной ступени, коэффициентом суммы смещений в паре  $x_2$ , и углами наклона зубьев в определенных парах. Очевидно также, что такая схема может быть реализована при наличии свободно вращающихся на осях блоков колес. Компоновка по указанной схеме становится возможной преимущественно при использовании

вращающихся на осях блоков пластмассовых зубчатых колес. Для приводов приборов наиболее эффективным решением является изготовление блоков колес из пластмасс, обеспечивающих в большинстве случаев приемлемые значения триботехнических характеристик при использовании посадочных отверстий блоков в качестве подшипников скольжения.

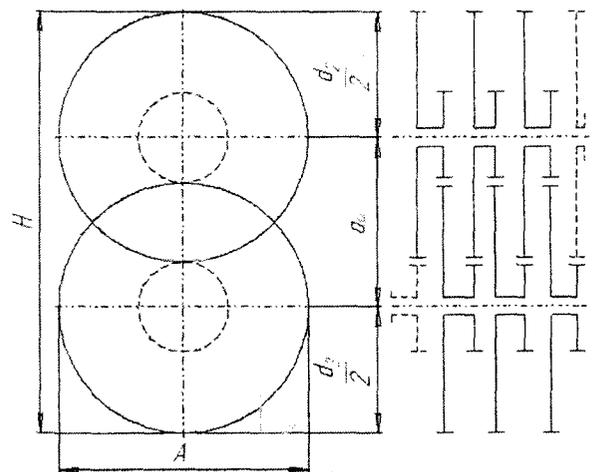


Рис. 1. Схема многоступенчатого рядового соосного механизма

Зубчатые передачи, используемые в приборных приводах, отличаются большими значениями общего передаточного отношения  $u_p$  – от сотен до нескольких десятков тысяч. При проектировании таких приводов используют многоступенчатые мелко модульные цилиндрические зубчатые передачи, преимущества которых перед волновыми и двухступенчатыми червячными заключаются в технологичности конструкции, компактности компоновки и универсальности.

Из конструктивных соображений получения приемлемых габаритов механизма целесообразно принимать передаточное число в одной ступени  $u_j$  в пределах  $3 < u_j < 6$  при опорах на подшипниках качения и  $u_{j_{min}} = 2$  при использовании подшипников скольжения. Поскольку характеристики угловой погрешности, приведенного момента инерции, КПД улучшаются при больших передаточных отношениях в ступенях механизмов, особенно тихоходных, распределение  $u_p$  целесообразно производить по условию:

$$u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_j \leq \dots \leq u_n. \quad (1)$$

При равномерном распределении  $u_p$  по ступеням редуктора имеем:

$$u_j = \sqrt[n]{u_p}. \quad (2)$$

При неравномерном распределении  $u_p$  принимают один из законов экспоненциальной, геометрической или арифметической прогрессии.

Габаритные размеры редуктора – длину  $A$ , ширину  $B$  и высоту  $H$  можно записать в следующем виде:

$$A = m z_1 \sqrt[n]{u_p}; \quad (3)$$

$$B = K_c \psi_{bm} m n; \quad (4)$$

$$H = m z_1 [(1 + \sqrt[n]{u_p}) + 2\sqrt[n]{u_p}] / 2, \quad (5)$$

где  $\psi_{bm} = b/m$  – коэффициент ширины зубчатого венца;  $K_c = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент, зависящий от числа рядов и торцевых зазоров между венцами блоков зубчатых колес.

Перемножив габаритные размеры  $A \cdot B \cdot H$ , получим выражение для объема редуктора:

$$V_c = m z_1 \sqrt[n]{u_p} \cdot K_c \psi_{bm} m n \cdot m z_1 [(1 + \sqrt[n]{u_p}) + 2\sqrt[n]{u_p}] / 2. \quad (6)$$

Выделяя основные параметры, от которых зависит объем редуктора, получим итоговое выражение для относительного объема соосного редуктора:

$$V_c / \gamma_c = u_p^{1/n} (1 + 3u_p^{1/n}) n, \quad (7)$$

где  $\gamma_c = m^3 z_1^2 \psi_{bm} K_c / 2$  – параметр, характеризующий относительный объем.

Минимизируя функционал (7), приравняв нулю производную по  $n$  и приняв некоторое фиксированное значение  $u_p$ , например  $u_p = 10$ , после необходимых преобразований получим оптимальное значение числа ступеней  $n_{opt} = 3,915 \cdot \lg u_p$ , при этом передаточное число каждой ступени редуктора равно:

$$u_{j_{opt}} = 10^{1/n_{opt}} = 1,8. \quad (8)$$

Для сравнения приведем результаты аналогичного расчета объема редуктора (таблица 1) для конструкций по схеме уступом под различными углами расположения ступеней  $\varphi$  (угол к линии, соединяющей центры осей входного и выходного валов, рис. 2). Главным достоинством этих расчетов стал вывод обобщенной формулы для всех рассмотренных случаев, что является новым относительно работ [5, 6].

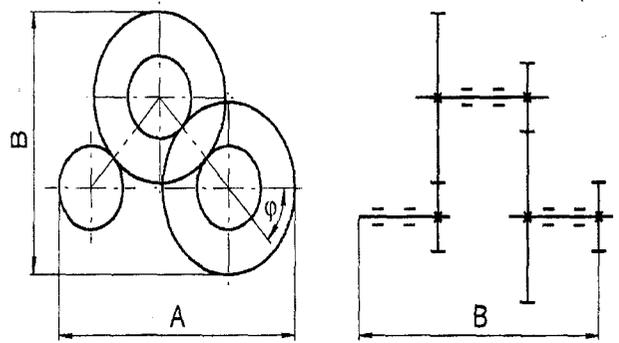


Рис. 2 Конструкция редуктора по схеме уступом

На рис. 3 представлена зависимость объема редуктора от передаточного числа при различных видах компоновки – соосной, орбитальной, уступом и уступом под углом  $\varphi = 60^\circ$ . В таблице 2 представлены результаты сравнения расчетных зависимостей для оптимизации многоступенчатых механизмов различных вариантов компоновочных схем по критерию минимизации габаритов (объема редуктора) [4].

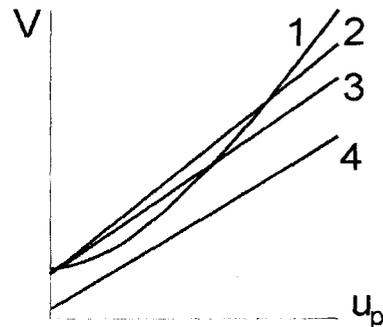


Рис. 3. Зависимость объема редуктора от передаточного числа при компоновках: 1 – орбитальной, 2 – уступом, 3 – уступом под углом  $60^\circ$ , 4 – соосной

Из анализа графика, представленного на рис. 3, и данных таблицы 2 следует, что многоступенчатый редуктор с соосной компоновкой является наиболее компактным. По сравнению с ним объем редуктора по схеме уступом, уступом при расположении ступеней под углом  $\varphi = 60^\circ$  и орбитальной компоновкой соответственно на 45...49 %, 29...35 % и 33...62 % больше.

Рассмотренная в работе схема рядового соосного зубчатого механизма использована при разработке привода компенсографа 7ND 2021. Для получения представления о таком редукторе приведем ряд данных – крутящий момент на выходном валу (вал привода барабана)  $T_{вых} = 4,664 \cdot 10^6$  Н·мм, частота вращения выходного вала  $n_{вых} = 2,654 \cdot 10^{-3}$  мин<sup>-1</sup>. Для определения мощности электродвигателя используются традиционные формулы для определения КПД в зацеплении (КПД подшипников скольжения 0,95). В конкретном случае КПД редуктора составляет 0,105, а расчетная мощность двигателя – 12 Вт.

Представим результаты еще одной оптимизации реального редуктора с передаточным числом в 2.700 и модулем 0,2 мм (рис. 4). Для межосевого расстояния 11,025 мм, при высоте и длине редуктора соответственно 14,5 мм и 25,8 мм удалось уменьшить объем на

одну треть, а за счет уменьшения ширины – более чем на треть. Число типоразмеров колес уменьшилось с 7 до 2, а число ступеней с 18 до 13. Кроме общего снижения габаритов произошло снижение потерь на трение, увеличилась относительная точность (благодаря уменьшению числа элементов), уменьшились масса и инерционность. Снижение числа звеньев и кинемати-

ческих пар соответствуют современной тенденции проектирования в приборостроении [5].

Исследования, проведенные на специально разработанном макете, показали, что в небольшом объеме (порядка 25 см<sup>3</sup>) можно получить большую редукцию (порядка 270.000.000), соосность же удобно использовать для создания коробки передач [1, 6].

Таблица 1 – Зависимость объема редуктора по схеме уступом от угла расположения ступеней  $\varphi$

Схема механизма			
$\varphi$	$(0^\circ \dots 90^\circ)$	$0^\circ$	$90^\circ$
A	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (1 + \sqrt{u_p}) \cdot (1 + n \cdot \cos \varphi)$	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (1 + \sqrt{u_p}) \cdot (1 + n)$	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (1 + \sqrt{u_p})$
B	$[n + (1 + n) \cdot K_1] \cdot \psi_{em} \cdot m$		
H	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (2 \cdot \sqrt{u_p} + (1 + \sqrt{u_p}) \cdot \sin \varphi)$	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (2 \cdot \sqrt{u_p})$	$\frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (1 + 3 \cdot \sqrt{u_p})$
$\gamma$	$\frac{m^3 \cdot z_1^2 \cdot \psi_{em}}{4} \cdot (1 + \sqrt{u_p})$		
V	$\gamma(1 + n \cos \varphi) [n + (n + 1)K_1] \cdot (2\sqrt{u_p} + (1 + \sqrt{u_p}) \sin \varphi)$	$\gamma(1 + n) [n + (n + 1)K_1] 2\sqrt{u_p}$	$\gamma [n + (n + 1)K_1] (1 + 3\sqrt{u_p})$
V/ $\gamma$	$(1 + n \cos \varphi) [n + (n + 1)K_1] \cdot (2\sqrt{u_p} + (1 + \sqrt{u_p}) \sin \varphi)$	$(1 + n) [n + (n + 1)K_1] 2\sqrt{u_p}$	$[n + (n + 1)K_1] (1 + 3\sqrt{u_p})$
V/ $\gamma$	$(1 + n \cdot \cos \varphi) \cdot [n + (n + 1) \cdot K_1] \cdot (2 \cdot \sqrt{u_p} + (1 + \sqrt{u_p}) \cdot \sin \varphi)$		

Таблица 2 – Результаты анализа зависимостей для оптимизации по объему многоступенчатого соосного редуктора

Кинематическая схема	Передаточное число ступени $u_i$	Оптимальное число ступеней, $n_{opt}$	Соотношение объемов редукторов $V/V_c^{(1)}$
Уступом	1,66	$n_{opt} = 4,55 \lg u_p$	1,45 ÷ 1,49
Уступом под углом $\varphi$	1,64	$n_{opt} = 4,77 \lg u_p$	1,29 ÷ 1,45
Соосная	1,80	$n_{opt} = 3,915 \lg u_p$	1,0
Орбитальная	1,88 ÷ 2,0	$n_{opt} = 1,81 + 2,64 \lg u_p$	1,33 ÷ 1,62

$V_c$  – объем соосного редуктора

**Проблемы модификации пластмассовых зубчатых колес малых модулей**

В реальных зубчатых передачах коэффициент перекрытия  $\zeta < 1$ , если погрешности изготовления (например, погрешности окружных шагов, направления зубьев) преобладают над упругими деформациями.

Погрешности вызывает кромочный контакт либо на входе зубьев в зацепление, либо при выходе из

зацепления. Наличие кромочного контакта приводит к перераспределению до- и запольного участков линии зацепления и уменьшению КПД, особенно если возрастает допольный участок линии зацепления и угол входа в зацепление. С целью уменьшения длин участков кромочного зацепления следует провести модификацию сопряженных зубьев.

Необходимость профильной модификации зубьев – довод для отхода от стандартного исходного контура при проектировании колес малого модуля.

Для обеспечения работоспособности рассматриваемых передач должны предусматриваться боковые и радиальные зазоры, компенсирующие реальные погрешности, что невозможно обеспечить на базе стандартного исходного контура за счет дополнительного смещения в паре колес с малозубыми шестернями. Для образования требуемых зазоров необходимо изменить некоторые параметры исходного контура, например, применить нестандартный контур с неравномерным шагом.

Модификации профиля колес с рассматриваемыми модулями стандартами не предусмотрены, а, кро-

ме того, ГОСТ 9178-81 нормирует параметры точности зубчатых колес и передач с  $m \geq 0,1$  мм. В работе [10] предложены технологические приемы проведения модификации для колес, рассматриваемого интервала модулей, но только для процессов зубофрезерования. Иначе говоря, модификация также требует нестандартного исходного контура.

Параметры нестандартного исходного производящего контура, таким образом, определяются из условий обеспечения максимального КПД и требуемых зазоров в передаче, изготовленной со средней экономической точностью. На основе данных работы [9] основные эксплуатационные требования к зубчатым передачам малого модуля сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Основные эксплуатационные требования к зубчатым передачам малого модуля

Зубчатые передачи с колесами малого модуля (0,08...0,3) мм	
Импульсный режим	
Приборы времени	Шаговый двигатель с циклическим изменением Т
Наиболее важные эксплуатационные требования	
Шестерни с малым числом ( $Z_1 \geq 6$ );	Максимальный КПД (влияющий на расход энергии и надежность)
Большие величины относительных погрешностей изготовления при значениях допусков на отклонения шагов, диаметров вершин, радиального биения и других параметров, не превышающих 0,01 мм;	Мгновенные значения передаточного отношения
Средняя стоимость принятых методов изготовления	Максимальное среднее значение передаточного отношения моментов
Относительная суммарная погрешность межосевого расстояния до 0,3 м	

**Особенности технологии изготовления пластмассовых зубчатых колес малых модулей**

В работе [9] введено понятие зубчатых колес малых модулей, к которым относят  $m < 0,3$  мм. В рассматриваемых конструкциях используются блоки колес, изготовленных литьем под давлением в термопластавтоматах и имеющих модуль 0,2 мм.

Подробно технология литья зубчатых колес под давлением изложена в фундаментальных работах Института механики металлополимерных систем НАНБ [10, 11], а кратко – в работе [9]. Основные положения этой технологии заключаются в следующем. Формообразующие детали пресс-формы для литья получают методом гальванопластики (широко применяется в часовой промышленности) или электроэрозионным методом. Последний реализуется двумя способами: с использованием проволоочного электрода на станках с ЧПУ и при использовании профильных электродов по принципу прошивки с объемным копированием электрода (реализуется на двухпозиционном станке: первая позиция – черновая, электроимпульсная, вторая – чистовая, электроискровая). Получаемые матрицы пресс-форм обладают высоким качеством и производительностью. Гальванопластика позволяет получить размеры матрицы по 7-му качеству с шероховатостью обрабатываемых поверхностей  $R_a = 0,08$  мкм (в данном случае требуется точный инструмент: профильный электрод или мастер-модель).

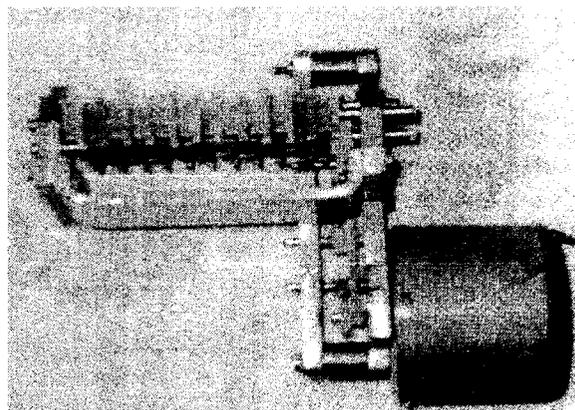


Рис. 4. Внешний вид модели соосного редуктора

Расчет и изготовление матриц ведут с учетом компенсации усадки полимерного материала и самой матрицы, если последняя изготавливается электроэрозионным методом профильным электродом. При малом числе зубьев усадка имеет неравномерный характер, хотя при расчете применяют упрощенную модель равномерной радиальной усадки. Для повышения точности отливаемых колес размеры матрицы корректируются с учетом средней величины усадки конкретной марки материала. Для компенсации технологической усадки на стадии проектирования пластмассовых зубчатых колес можно изменять коэффициент исходного контура, изменять угол профиля или модуль зацепле-

ния. Чаще всего корректируют модуль колеса с учетом величины усадки поступающей партии материала.

Практика показывает, что для мелко модульных шестерен в целях компенсации усадки следует корректировать одновременно и модуль, и угол зацепления. При проектировании мастер-модели необходим отход от стандартного исходного контура колес. Следовательно, оптимизация параметров исходного контура и профильной модификации не ограничивается требованием применением стандартного инструмента с традиционным исходным контуром.

В работе [11] предложен метод более адекватного учета условий усадки материала (с учетом колебаний усадки при формировании изделия и анизотропии усадки в самом изделии). Сущность метода заключается в поэтапном проектировании пресс-форм с помощью САПР на основе пакета прикладных программ (ППП) «MARKO», разработанных в ИММС НАНБ с участием СПбГУ ИТМО и являющихся частью САПР деталей из пластмасс (шарниров, зубчатых колес, подшипников, деталей с резьбой и закладной арматурой).

В С-Петербургском государственном технологическом институте (ТУ) разработан ППП «LPD MOLD», который позволяет подготовить программу для форм для станков с ЧПУ. Этот пакет пригоден для оптимизации решений и конструкций литниковых систем, форм для литья под давлением, а так же технологических решений по обеспечению заданного или прогнозируемого качества изделий при литье. По целям и задачам пакет соответствует известным зарубежным программам («MOLDFLOF», «STRIMFLOF»).

В работе [9] содержатся сведения о разработке «САПР часовых зубчатых передач с произвольным профилем» во ВНИИ часовой промышленности при участии ОрелГТУ. Данная система может успешно применяться для проектирования мелко модульных зубчатых передач приборов точной механики, когда стандартный эвольвентный исходный контур не обеспечивает высоких показателей качества и возникает задача оптимизации профиля зуба. Указанная САПР позволяет рассчитать зуборезный инструмент, как первого порядка – дисковые и червячные фрезы, так и второго – фасонные резцы (дисковые резцы для дисковых фрез) и затыловочные круги. Возможности системы позволяют анализировать работу зубьев в нескольких точках линии зацепления, дают наглядное представление об углах входа зубьев в зацепление и выхода зубьев из зацепления, о значении зазоров при предельно допустимых значениях параметров геометрии зубчатых колес. Данная САПР обеспечивает расчет проекторных чертежей, использующихся при контроле профиля зубьев, а также зуборезного инструмента первого и второго порядков.

#### Выводы

Многоступенчатые соосные зубчатые механизмы удобно использовать в приводах приборах типа самописцев, компенсографов и т.п., обеспечивая за-

данные дискретные значения скорости механизма. Необходимы дальнейшие исследования, уточняющие потери на трение и пределы для параметров механизмов, передаваемых крутящих моментов.

Применение новых конструкционных материалов из группы полиамидов позволит заменить металлы по прочностным и антифрикционным свойствам.

Новое поколение редукторов соосного типа является перспективной разработкой, которая найдет широкое применение в приборостроении.

#### Литература:

- 1 Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Старжинский В.Е. Состояние и перспективы развития соосных многоступенчатых редукторов нового поколения // Матер. МНТК: Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы / Под ред. Е.В. Шалобаева. – СПб.: ЦЦП «Светоч». – 2003. – С. 55.
- 2 Пластмассовые зубчатые колёса в механизмах приборов. Справочное и научное издание // В.Е. Старжинский, Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев, А.Т. Кудинов / Под общ. ред. В.Е. Старжинского и Е.В. Шалобаева – СПб. – Гомель: ИММС НАНБ, 1998. – 538с.
- 3 Старжинский В.Е. Оптимизация многоступенчатых приборных зубчатых редукторов с орбитальной компоновкой // В.Е. Старжинский, Е.В. Шалобаев, С.А. Осипенко, А.А. Бабченко // Передачи и трансмиссии. – 1997. – №2. – С. 15-24.
- 4 Шалобаев Е.В. Компоновочные схемы и оптимизация кинематических параметров редукторов приборов // Матер. МНТК / Под ред. Е.В. Шалобаева. – СПб.: ЦЦП «Светоч». – 2003. – С. 236.
- 5 Старжинский В.Е., Осипенко С.А., Шалобаев Е.В. Выбор кинематических параметров многоступенчатых зубчатых передач // Вестник Харьковского гос. политехнического университета. Технология машиностроения. Вып. 109. – 2000. – С.173-180.
- 6 Starzhinsky V.E. On compiling a terminological reference dictionary on Gearing / V.E.Starzhinsky, Yu.L.Soliterman, A.M.Goman, E.V.Shalobaev, S.V.Shcherbakov // Proc. IC «Power Transmissions-03». – «Theory, calculation and Design of Transmission Elements». – Varna. Bulgaria, 2003. – P. 180-186.
- 7 Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С. Оптимизация габаритов соосных схем редукторов //: Матер. МНТК СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – С.113-114.
- 8 Монахов Ю.С. Из опыта проектирования соосных редукторов с блоками зубчатых колес из пластмассы / Ю.С.Монахов, Д.Г.Суриков, Е.В.Шалобаев, В.Е.Старжинский. // Матер. ВНТК. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – С.115-117.
- 9 Козлова Л.Д. К вопросу проектирования пластмассовых зубчатых колес малого модуля // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2003. – №4. – С.7-8.
- 10 Старжинский В.Е. Точные пластмассовые детали и технологии их получения / В.Е. Старжинский [и др]. – Минск: 1993. – 307 с.
- 11 Старжинский В.Е. Пластмассовые зубчатые колеса в передачах точного приборостроения / В.Е. Старжинский [и др]. – Минск: 1993. – 359 с.

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. Киричек А.В., канд. техн. наук Афонин А.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419877; E-mail: [tmsi@ostu.ru](mailto:tmsi@ostu.ru)

## РАСЧЕТ ВЫСОТЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПРИ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОХВАТЫВАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

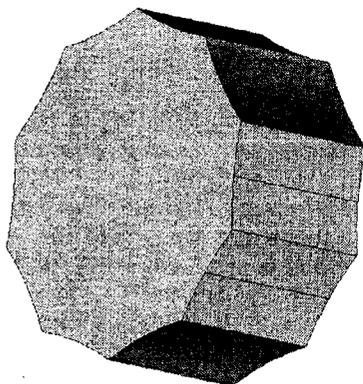
*In article the design of covering tool for Static pulse processing external cylindrical surfaces is described. The technique of the approached calculation of height of microroughnesses of the surface strengthened by the given tool is given.*

Статико-импульсная обработка (СИО) пластическим деформированием является одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения деталей машин [2]. СИО осуществляется в условиях постоянного статического и периодического динамического (ударного) воздействия деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Глубина упрочненного слоя при СИО может достигать 10 мм и более при максимальной степени упрочнения до 200 %.

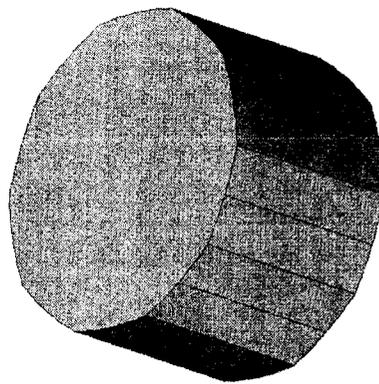
В связи с импульсным характером нагружения инструмента при СИО на обрабатываемой поверхности может образовываться специфическая волнистость, представляющая собой следы от внедрений инстру-

мента в поверхность заготовки под действием единичных импульсов. При неправильном выборе режимов обработки высота данных микронеровностей может достигать значительной величины (рис. 1).

Снизить высоту микронеровностей при СИО обычным цилиндрическим инструментом (дисковым или стержневым роликом) можно, уменьшив скорость главного движения или увеличив частоту деформирующих импульсов [1]. Однако уменьшение скорости главного движения может привести к снижению производительности обработки, а увеличение частоты деформирующих импульсов – к снижению их энергии, и, как следствие, к уменьшению степени упрочнения и глубины упрочненного слоя.



а)



б)

Рис. 1. Микронеровности при СИО наружных цилиндрических поверхностей: а – цилиндрическим инструментом; б – охватывающим инструментом

При СИО наружных цилиндрических поверхностей можно добиться снижения высоты микронеровностей при использовании охватывающего деформирующего инструмента вместо обычного цилиндрического. Охватывающий инструмент для статико-импульсного упрочнения наружных цилиндрических поверхностей (рис. 2) представляет собой волновод 1, с помощью которого инструменту сообщаются статическая  $P_{ст}$  и динамическая  $P_{имп}$  составляющие деформирующей силы от генератора механических импульсов [2]. К волноводу крепится корпус, состоящий из

правой 2 и левой 3 половинок. В корпусе на роликах и шариках установлен деформирующий инструмент – кольцо 4. Кольцо 4 имеет на внутренней поверхности коническую заборную и цилиндрическую калибрующую части. Правая и левая половинки корпуса соединяются между собой болтами. Высота микронеровностей для СИО наружных цилиндрических поверхностей рассчитывается, как след внедрений инструмента под действием единичных импульсов во вращающуюся заготовку (рис. 3), т.к. скорость удара многократно превышает скорость главного движения.

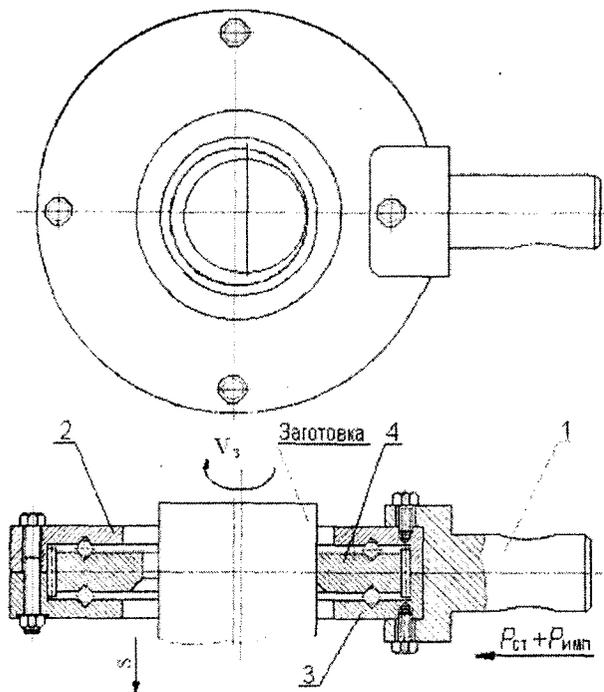


Рис. 2. СИО наружных цилиндрических поверхностей охватывающим инструментом

Геометрически можно определить высоту микронеровностей  $h$  при статико-импульсном упрочнении наружных цилиндрических поверхностей предлагаемым охватывающим инструментом по формуле:

$$h = y - c \cdot \cos \frac{\beta}{2} - R_{заг} + \delta, \quad (1)$$

где  $y = \sqrt{R_{ин}^2 - \frac{a^2}{4}}$ ;  $a = 2 \cdot c \cdot \sin \frac{\beta}{2}$ ;  $c = R_{ин} - R_{заг} + \delta$ ;

- $h$  – высота микронеровностей;
- $y$  – длина отрезка АВ (рис. 5);
- $R_{заг}$  – радиус заготовки, мм;
- $R_{ин}$  – радиус инструмента, мм;
- $\delta$  – глубина внедрения инструмента в заготовку под действием единичного импульса, мм;
- $\alpha$  – перемещение охватывающего инструмента для статико-импульсного накатывания резьбы в последующий момент обработки;
- $c$  – расстояние между центрами обрабатываемой заготовки и охватывающего инструмента.

$\beta = \frac{\omega \cdot t}{60}$  – угол поворота заготовки за время одного

- ударного импульса, рад.;
- $T = 1/f$  – время цикла удара, с;
- $f$  – частота импульсов, Гц;
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$  – угловая скорость заготовки, рад/мин;
- $N$  – частота вращения заготовки, мин<sup>-1</sup>.

С учетом выпучивания металла при внедрении инструмента в заготовку высота неровностей увеличивается на значение, пропорциональное коэффициенту высоты выдавленного профиля  $K_h$ , равного отношению полной высоты выдавленного профиля к глубине

внедрения инструмента  $\delta$ . Для наружных цилиндрических поверхностей  $K_h$  лежит в диапазоне 1...2.

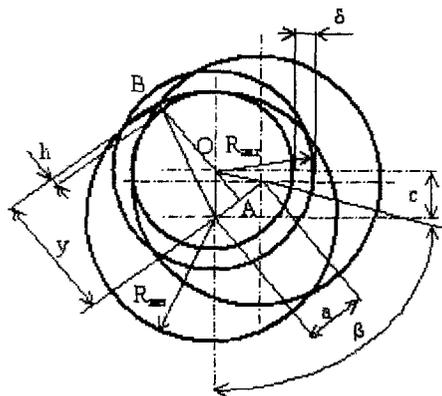


Рис. 3. Схема для расчета волнистости при СИО наружных цилиндрических поверхностей охватывающим инструментом

Статический поджим кольца к поверхности заготовки при ее вращении будет способствовать сглаживанию неровностей. Сглаживание может быть оценено коэффициентом статического сглаживания  $K_{ст}$ , значение которого зависит от величины статического поджима, механических свойств материала заготовки и диаметров заготовки и инструмента и может быть определено экспериментально.

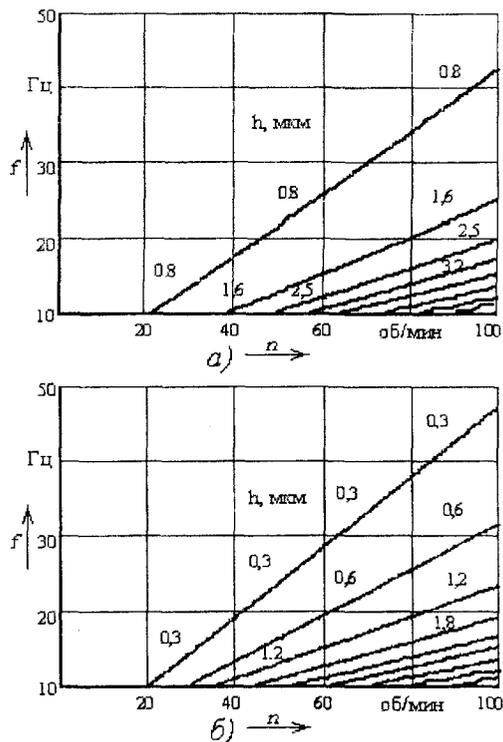


Рис. 4. Расчетное значение высоты микронеровностей вала диаметром 40 мм, подвергнутого СИО инструментом диаметром 60 мм: а) цилиндрическим; б) охватывающим

Ряд других факторов, например упругое восстановление отпечатка или жесткость системы СПИД,

либо не оказывает существенного влияния на высоту волнистости, либо их влияние не может быть точно оценено аналитическими методами.

В связи с этим приближенная формула для расчета высоты неровностей при СИО наружных цилиндрических поверхностей охватывающим инструментом примет вид:

$$h = \left( y - c \cdot \cos \frac{\beta}{2} - R_{заг} + \delta \right) K_n K_{см}. \quad (2)$$

Сравнение высоты микронеровностей при СИО наружных цилиндрических поверхностей обычным цилиндрическим и охватывающим инструментом (рис. 4) показывает, что при использовании охватывающего инструмента высота микронеровностей снижается в 2 и более раз при тех же режимах обработки. Используя приведенную методику приближенного расчета высоты микронеровностей можно подобрать рациональные режимы СИО наружных цилиндрических поверхностей деталей машин, обеспечивающие максимальную производительность при обеспечении требуемой шероховатости и волнистости упрочняемой поверхности. Значительная энергия ударных импульсов при СИО (до 40 Дж [2]) позволит обеспе-

чить достаточную удельную энергию деформирования, обеспечивающую значительную степень упрочнения, даже при использовании охватывающего инструмента, имеющего значительно большую площадь пятна контакта с заготовкой, по сравнению с цилиндрическим. Применение охватывающего инструмента позволит существенно повысить производительность СИО наружных цилиндрических поверхностей и качество упрочняемых поверхностей.

Исследования выполнялись при поддержке грантов РФФИ и президента РФ.

#### Литература:

1 Киричек А.В., Афонин А.Н. Приближенный расчет волнистости наружных цилиндрических поверхностей, упрочненных статико-импульсной обработкой. Сб. матер. МНТК «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения». Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 175-178.

2 Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

УДК 621.787.4

Канд. техн. наук Короткий Г.П.  
(Орловский государственный технический университет)  
г. Орел, тел. (4862)419835; E-mail: [avtopl@ostu.ru](mailto:avtopl@ostu.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБКАТКИ РОЛИКАМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

*In a paper the feasibility of a running in is shown by rollers at manufacture of thin-walled stepwise axisymmetrical parts of the equipment of a heavy machine industry with a justification of efficiency of its use, and also the technique of definition of technological parameters of the process of a running in for deriving parts with preset indexes of hardening is reduced.*

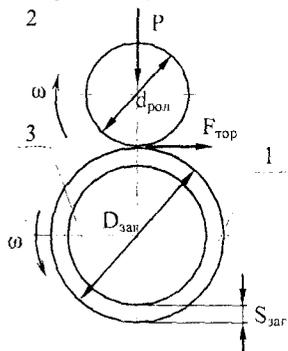
В тяжелом машиностроении, в частности, в кривошипных прессах, широко применяются различные подшипники скольжения. Детальями, определяющими прочность и работоспособность узла, являются бронзовые втулки-вкладыши. Известные технологии их изготовления заключаются в получении отливки или поковки и последующей механообработке поверхностей. При этом срезается наружный мелкозернистый и наиболее прочный слой металла, что снижает прочность и износостойкость деталей.

Одним из способов упрочнения поверхности полых деталей является обкатка роликами, плавно и стабильно снижающая шероховатость, увеличивающая прочность, создающая благоприятные остаточные сжимающие напряжения. Многочисленные исследо-

вания показывают, что для получения максимального упрочняющего эффекта при обкатке тонкостенных деталей следует применять ролики малого диаметра, т.к. роликами относительно большого диаметра не удастся добиться достаточного упрочнения поверхности без раскатки стенки изделия. Однако применение роликов малого диаметра не всегда возможно.

На кафедре «Автопласт» Орловского государственного технического университета предложен новый процесс упрочнения обкаткой роликами тонкостенных осесимметричных изделий [1, 2]. Суть его заключается в том, что при обкатке к ролику, помимо радиальной силы, прикладывают тангенциальную силу, подтормаживающую ролик (рис. 1). Поскольку при использовании роликов относительно большого

диаметра (сопоставимого с диаметром заготовки) нельзя увеличить деформацию в радиальном направлении без раскатки заготовки, эффект упрочнения можно увеличить только за счет увеличения сдвиговой деформации путем приложения к ролику в процессе обкатки тормозной силы. Это позволяет повысить эффективность упрочняющей обработки за счет увеличения суммарной деформации.



(1 – обкатываемая деталь, 2 – ролик, 3 – оправка)

Рис. 1. Схема процесса обкатки

Теоретические и экспериментальные исследования обкатки заготовок из литейных алюминиевых сплавов [2, 3] позволили определить влияние параметров процесса обкатки на свойства получаемых деталей, в частности, на глубину наклепанного слоя и упрочнение поверхности. Теоретическое исследование проводилось путем конечно-элементного моделирования с помощью пакета прикладных программ «ШТАМП», предназначенного для статического анализа упругих и упруго-пластических систем, пошагового расчета перемещений, напряжений и деформаций методом конечных элементов [4].

Одним из основных исходных элементов расчета является кривая упрочнения конкретного металла или сплава, которая специально вводится в расчетный модуль. Экспериментальные исследования про-

водились на специально разработанной экспериментальной оснастке, позволяющей обкатывать тонкостенные заготовки с заданными значениями радиальной и тормозной силы на ролике.

По результатам проведенных исследований разработана методика определения параметров процесса обкатки для получения заданного упрочнения тонкостенных заготовок, позволяющая обеспечить заданные показатели упрочнения после обкатки (глубину упрочненного слоя и величину упрочнения поверхности) или добиться максимально возможного упрочнения металла заготовки без ее раскатки и последующего разрушения. В первом случае необходимо определить значения радиальной силы  $P$  и тормозной силы  $F_{\text{тор}}$ , приложенных к ролику для получения заданных показателей упрочнения. Во втором – необходимая глубина упрочненного слоя принимается равной половине толщины стенки заготовки. Из этого условия определяются максимально допустимые значения  $P$  и  $F_{\text{тор}}$  для получения максимального упрочняющего эффекта. Затем с учетом механических свойств материала определяется максимальное упрочнение.

Величина радиальной погонной силы определяется по номограмме, показанной на рис. 2, исходя из диаметров заготовки и ролика и толщины стенки заготовки. На рис. 2 показан пример определения значения радиальной погонной (отнесенной к ширине заготовки) силы при следующих исходных данных:  $D_{\text{заг}} = 120$  мм;  $S_{\text{заг}} = 7$  мм;  $d_{\text{рол}} = 120$  мм.

Искомая величина равна 700 Н/мм. Умножением этого значения на ширину заготовки определяется значение радиальной силы обкатки  $P$ .

После этого определяется тормозная сила  $F_{\text{тор}}$ . Для получения максимального упрочняющего эффекта ее значение должно быть максимально приближено к силе трения между контактными поверхностями заготовки и ролика, не вызывая при этом проскальзывания ролика по заготовке.

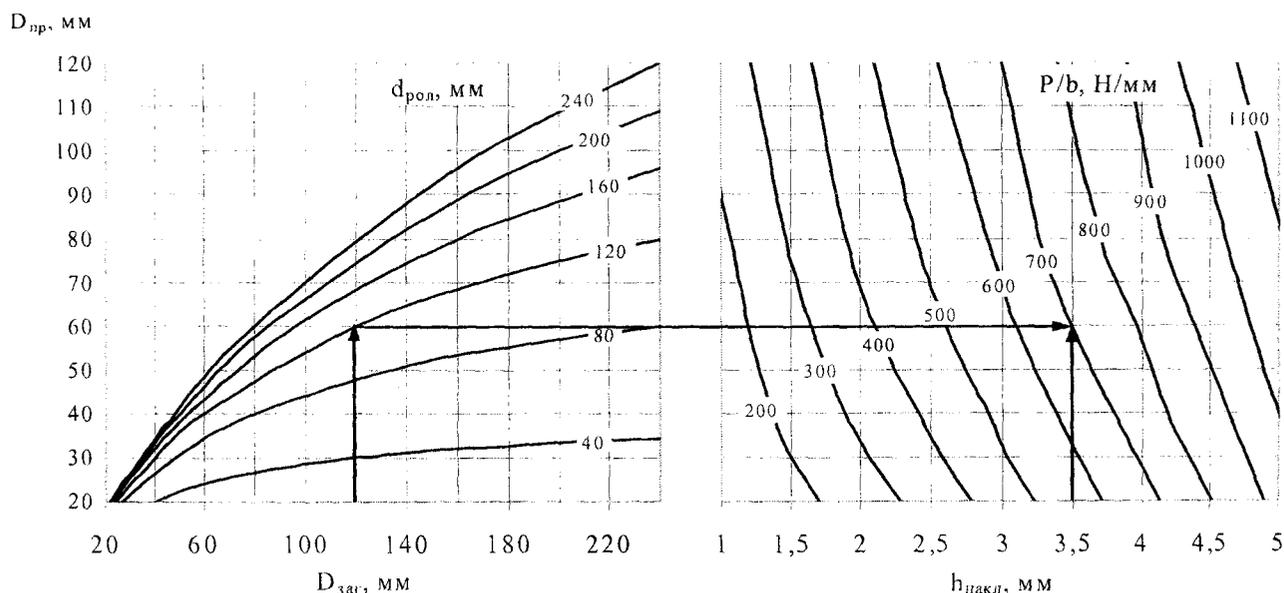


Рис. 2. Номограмма для определения погонного радиального усилия обкатки

Поэтому  $F_{тор}$  определяется по формуле:

$$F_{тор} \rightarrow F_{тор}^{max} = P \cdot \mu, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между поверхностями ролика и заготовки.

По диаграмме (рис. 3) определяется максимально достижимое упрочнение  $H_{max}$  металла заготовки диаметром  $D_{заг} = 100$  мм при максимальной  $F_{тор}$ .

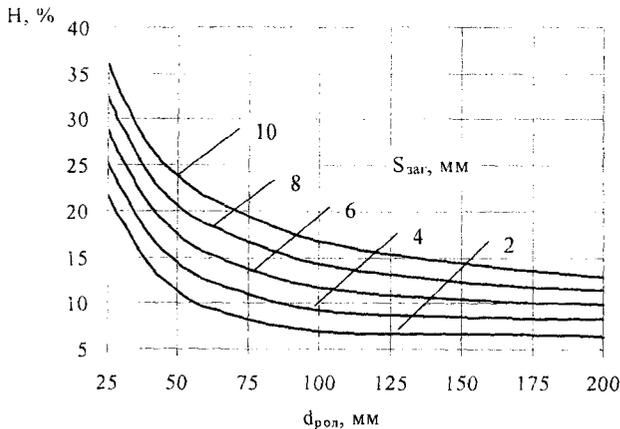


Рис. 3. Диаграмма для определения  $H_{max}$  металла при обкатке роликом:  $F_{тор} = max$ ,  $D_{заг} = 100$  мм

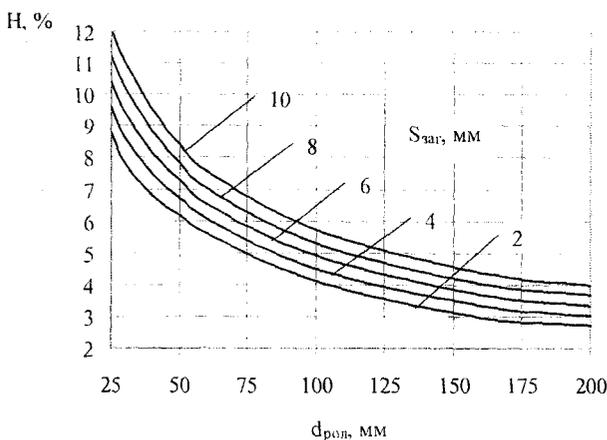


Рис. 4. Диаграмма для определения  $H_{max}$  металла при обкатке роликом:  $F_{тор} = 0$ ,  $D_{заг} = 100$  мм

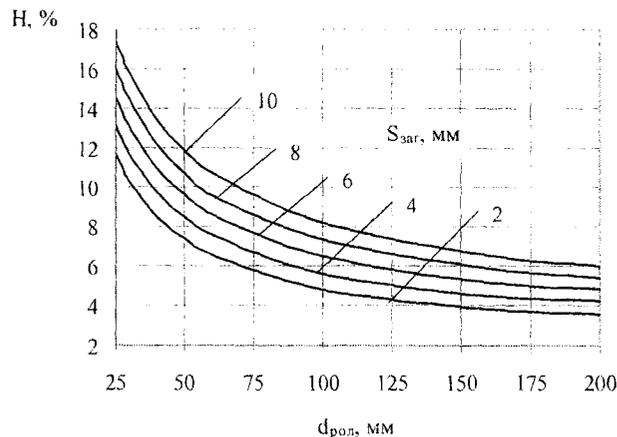


Рис. 5. Диаграмма для определения  $H_{max}$  металла при обкатке роликом:  $F_{тор} = 0,5 max$ ,  $D_{заг} = 100$  мм

Относительное упрочнение находят по формуле:

$$H = \frac{\sigma_{Smax} - \sigma_{S0}}{\sigma_{S0}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $\sigma_{Smax}$  и  $\sigma_{S0}$  – максимальное и начальное значения напряжения текучести.

На рис. 4 и 5 приведены диаграммы для определения  $H_{max}$  металла при обкатке роликом заготовки диаметром  $D_{заг} = 100$  мм с  $F_{тор}$ , равной нулю и 0,5 max соответственно.

Если диаметр заготовки отличается от 100 мм, то необходимо уточнить величину упрочнения. Значение упрочнения, полученное из диаграмм рис. 3 – 5, нужно умножить на поправочный коэффициент  $k$ , определяемый по диаграмме, показанной на рис. 6.

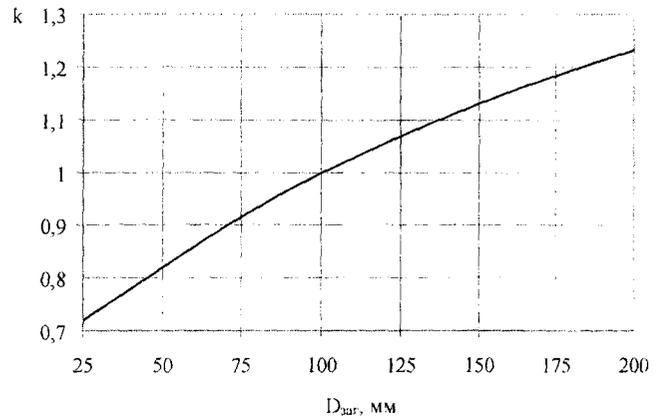


Рис. 6. Диаграмма для определения  $k$

Описанная методика может применяться при разработке технологии упрочнения поверхности втулок подшипников скольжения и других аналогичных деталей. Для этого при расчете необходимо ввести в расчетный модуль кривую упрочнения материала детали. Данная методика позволяет добиться наибольшей эффективности применения данного способа упрочнения без риска раскатки тонкой стенки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования России.

**Литература:**

- 1 Пат. 2163863 РФ, МКИ В 24 В 39/00. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / С.Ю. Радченко, В.А. Голенков, Г.П. Короткий и др. - Оpubл. 10.03.2001, Бюл. № 7. – 3 с.
- 2 Короткий Г.П. Совершенствование процесса обкатки тонкостенных литых осесимметричных деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 9. С. 16 – 19.
- 3 Голенков В.А., Радченко С.Ю., Короткий Г.П. Экспериментальное исследование процесса обкатки тонкостенных осесимметричных изделий // Сб. науч. тр. «Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием», Тула: ТулГУ, 1999 г.
- 4 Голенков В.А., Кондрашов В.И., Зыкова З.П. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением. Учебное пособие. М.: Машиностроение, 1994. – 190 с.

УДК 621-2.002.2; 621.81.002.2

Д-р техн. наук, проф. Степанов Ю.С., доц. Афанасьев Б.И., доц. Самойлов Н.Н., студ. Фомин Д.С.  
 (Орловский государственный технический университет)  
 г. Орел, тел. (4862)419877; E-mail: [tmsi@ostu.ru](mailto:tmsi@ostu.ru)

## СПОСОБ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПРУЖИННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*The technique offered is intended for a surface plastic processing with the aid of the tool with deforming elements as coils of steel helical cylindrical spring of circular section, coiled into a ring installed with tightness on the peripheral face of the disk and at the same time coils are located and fixed in grooves. The method widens technological possibilities for a process of surface plastic deformation, increases parameters of roughness on the surface worked, increases its hardness for a considerable depth due to not only percussive, but also smoothing action, increases productivity at the expense of contact spot increase in deforming elements with the surface to be worked and also decreases cost price of the process and decreases costs for tool production.*

При изготовлении деталей машин применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД) – обработку давлением, при которой пластически деформируется только поверхностный слой материала заготовки. Обработка ППД является эффективным методом получения поверхностей с регулярным микрорельефом, образования определенной макро- и (или) микрогеометрической формы, уменьшения шероховатости поверхности, изменения структуры материала без его полной рекристаллизации, создания определенного напряженного состояния и упрочнения поверхностным наклепом.

Аналогом предлагаемого способа является известный способ и реализующий его инструмент для центробежной обработки, деформирующие элементы которого (шарики или ролики) размещают в радиальных пазах диска с возможностью смещения в радиальном направлении [1]. Недостатками известного способа являются: низкая производительность из-за малого точечного пятна контакта деформирующих элементов, например шариков, с обрабатываемой поверхностью; сложность сборки и настройки, заключающаяся в том, что из-за большого количества деформирующих элементов и малого расстояния между ними невозможно установить и отрегулировать их на одном диаметре. Поэтому непостоянный натяг каждого деформирующего элемента ведет к нестабильному и низкому качеству обработанной поверхности.

Целью предлагаемого способа является расширение технологических возможностей заключающееся в повышении параметра шероховатости обработанной поверхности, увеличении её твердости на значительную глубину благодаря не только ударному, но и выглаживающему действиям, повышении производительности за счет увеличения пятна контакта деформирующих элементов с обрабатываемой поверхностью, а также снижении себестоимости процесса и удешевлении изготовления инструмента.

Предлагаемый способ относится к обработке поверхностным пластическим деформированием на-

ружных и внутренних поверхностей вращения, плоскостей, а с применением копира – фасонных поверхностей, при котором заготовке и инструменту сообщают вращательные движения и движение подачи вдоль обрабатываемой поверхности. Можно также обрабатывать прерывистые поверхности и места сопряжений поверхностей. Обработку выполняют на токарных, шлифовальных и фрезерных станках. Например, при обработке вала ему сообщают вращательное движение  $V_3$ , а инструменту – вращательное  $V_и$  и движение продольной подачи  $S_{пр}$ .

Деформируемыми элементами инструмента, реализующего способ, являются витки 1 стальной круглого сечения винтовой цилиндрической пружины 2, свернутой в кольцо и размещенной на диске 3 (рис. 1). На периферийной цилиндрической поверхности диска 3, высота которого не более диаметра витка, выполнены пазы 4, расположенные под острым углом к продольной оси инструмента равным углу наклона витков пружины 2. Форма и размеры пазов 4 соответствуют форме и размерам витков 1 пружины 2, свернутой в кольцо, а глубина пазов выполнена не менее диаметра проволоки пружины. Винтовая цилиндрическая пружина 2 установлена с натягом на периферийной поверхности диска 3, при этом витки расположены и закреплены в пазах 4. Закрепление витков может быть осуществлено чсканкой 5, как показано на рис. 2. В этом случае возможен поворот витка, контактирующего с обрабатываемой заготовкой (см. рис. 3) относительно точки закрепления, который вызывает соударение витков и ведет к нестабильной обработке. Жесткое закрепление витков в пазах диска, например сваркой, предпочтительнее, так как позволяет получить стабильное качество обработки.

Сущность процесса заключается в том, что при работе инструмент устанавливается с некоторым натягом  $h$  относительно обрабатываемой заготовки, благодаря которому часть витка, контактирующего с заготовкой, смещается в радиальном направлении, а виток из цилиндрического превращается в эллипс (рис. 4).

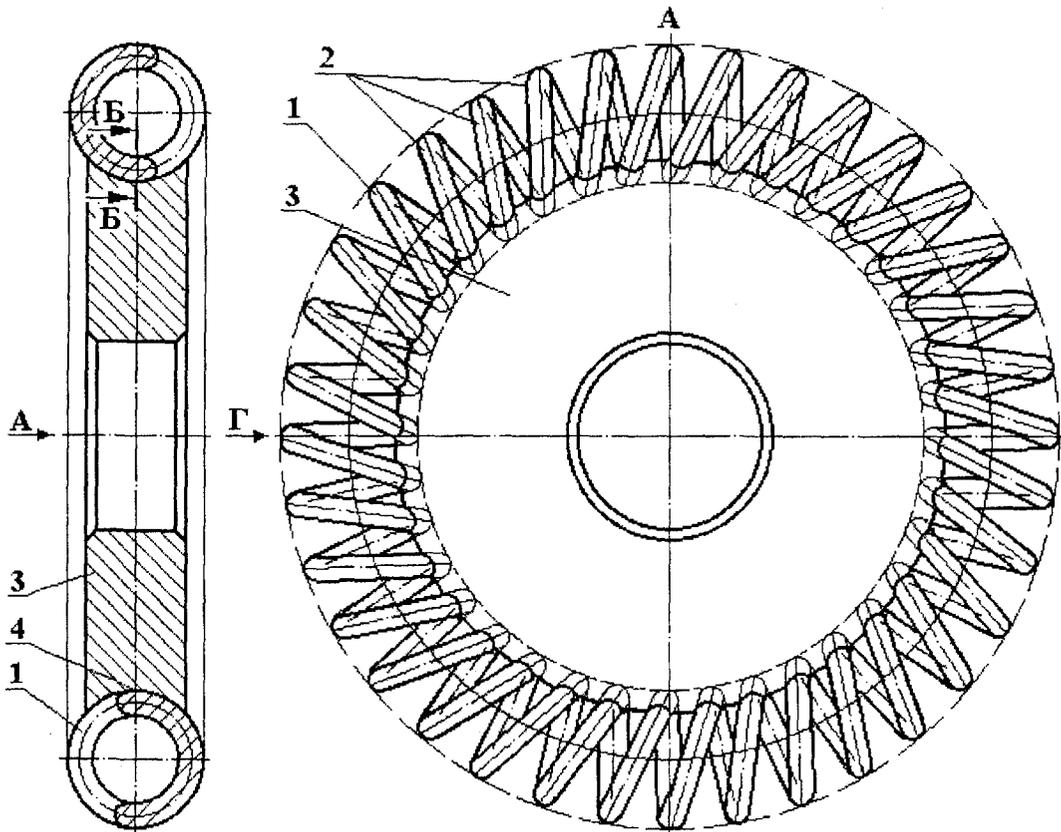


Рис. 1. Инструмент, реализующий предлагаемый способ, с деформирующими элементами в виде витков кольцевой пружины

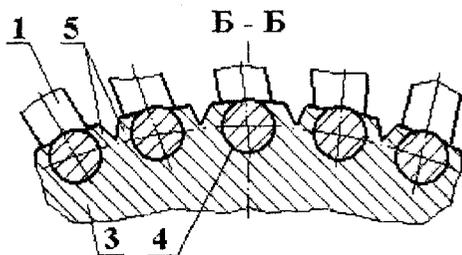


Рис. 2. Способ крепления чеканкой витков пружины на диске

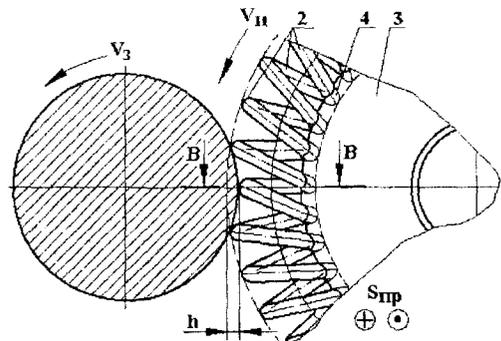


Рис. 3. Схема процесса обработки поверхностным пластическим деформированием наружной поверхности вала витками пружины

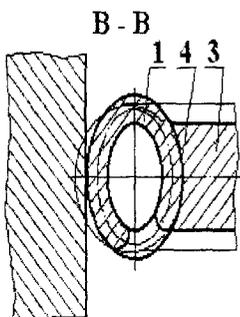


Рис. 4. Эллиптическая форма витка в рабочем состоянии

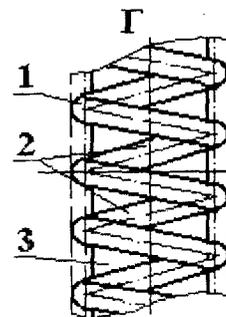


Рис. 5. – К определению направления пазов для установки деформирующих витков

Инструмент с деформирующими элементами в виде витков кольцевой пружины вращается с высокой скоростью. Элементы при этом наносят на поверхности заготовки многочисленные удары, пластически деформируя поверхность, и мгновенно отскакивают от неё. Помимо удара элементы за все время контакта производят выглаживающее действие.

В результате пластической деформации микронеровностей и поверхностного слоя параметр шероховатости поверхности повышается до  $R_a = 0,1...0,4$  мкм при исходном значении  $R_a = 0,8...3,2$  мкм. Твердость поверхности увеличивается на 30...80 % при глубине наклепанного слоя 0,3...3 мм. Остаточные напряжения сжатия достигают на поверхности 400...800 МПа.

Предварительная обработка детали: шлифование до параметра шероховатости  $R_a = 0,4...1,6$  мкм, а также чистовое точение или растачивание поверхностей с шероховатостью  $R_a = 3,2$  мкм.

Выглаживающе-ударную обработку по предлагаемому способу применяют при изготовлении заготовок из цветных металлов и сплавов, чугуна и стали твердостью до *HRC* 58...64.

Деформирующие элементы инструмента, т.е. витки пружины изготовляют из сталей: легированных ШХ15, ХВГ, 9Х, 5ХНМ, углеродистых инструментальных У10А, У12А, быстрорежущих Р6М5, Р9. Твердость рабочей поверхности витков из сталей *HRC* 62...65. Параметр шероховатости рабочего профиля витков пружины  $R_a = 0,32$  мкм.

Условия обработки, такие, как твердость поверхностного слоя, глубина наклепа и шероховатость поверхности зависят от силы удара и числа ударов, приходящихся на 1 мм<sup>2</sup> поверхности. Эти параметры, в свою очередь, зависят от окружной скорости диска, натяга *h*, размера витков, их числа в диске, частоты вращения, величины подачи на один оборот заготовки и числа проходов.

Проводилась обработка поверхностей инструментом с деформирующими элементами в виде витков

диаметром 8...10 мм кольцевой пружины из проволоки диаметром 2...2,5 мм из стали ШХ15 с режимами, приведенными в таблице 1.

При неправильно выбранном режиме может возникнуть перенаклеп поверхности с растягивающими остаточными напряжениями в поверхностном слое, которые ведут к трещинам и отслаиванию поверхностного слоя. Для получения высокого качества поверхности необходимо соблюдать следующие условия обработки:

- обеспечение постоянной величины натяга *h*;
- допускаемое радиальное биение витков кольцевой пружины, отклонения формы и радиальное биение заготовок не должны превышать 0,04...0,05 мм.

Обработка с большими натягами приводит к увеличению шероховатости поверхности, но при этом несколько увеличивается эффект упрочнения. Для получения поверхности заготовки высокого качества перед обработкой заготовки очищают от следов коррозии и обезжиривают. Обработку проводят с использованием смазочно-охлаждающего технологического средства. Деформирующие витки смазывают смесью индустриального масла (60 %) и керосина (40 %), поверхность заготовки – керосином. Оставлять припуск под обработку не следует, так как изменение размера весьма незначительно (2...5 мкм). После обработки этим инструментом точность заготовок соответствует 7...9-му квалитетам.

Предлагаемый способ расширяет технологические возможности процесса поверхностного пластического деформирования, повышает параметр шероховатости обработанной поверхности, увеличивает её твердость на значительную глубину благодаря не только ударному, но и выглаживающему действиям, повышает производительность за счет увеличения пятна контакта деформирующих элементов с обрабатываемой поверхностью, а также снижает себестоимость процесса и сокращает расходы на изготовление инструмента.

Таблица 1 – Режимы обработки поверхностей инструментом с деформирующими элементами в виде витков кольцевой пружины

Обрабатываемый материал	Окружная скорость, м/с		Подача, $S_{пр}$ , мм/об	Натяг, <i>h</i> , мм	Число проходов	Повышение твердости, %
	инструмента, $V_{и}$	заготовки, $V_{з}$				
Сталь	20...40	1...2	0,05...0,15	0,25...0,5	2...3	20...60
Чугун	20...25	0,5...1,5	0,1...0,15	0,2...0,4	2...3	40...70
Дюралюминий	10...15	0,1...0,5	0,05...0,15	0,02...0,3	1...2	30...40
Латунь, бронза	10...15	0,5...1,0	0,05...0,2	0,1...0,2	1...2	30...50

Примечание. Параметр шероховатости в исходном состоянии  $R_a = 0,32...1,6$  мкм, после обработки –  $R_a = 0,1...0,32$  мкм.

**Литература:**

1 Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. – Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещеряко-

ва. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 412-414.

УДК621.941.1.01(08)

Канд. техн. наук, доц. Кулаков А.Ф., асп. Кислов В.О.  
(Орловский государственный университет)  
г. Орел, тел. (4862)419877; E-mail: tmsi@ostu.ru

## УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ С НЕПРЕРЫВНО-ПОПЕРЕЧНОЙ ПОДАЧЕЙ

*In article experiment of precision turning of limp shaft with uninterrupted cross-feed management is shown.*

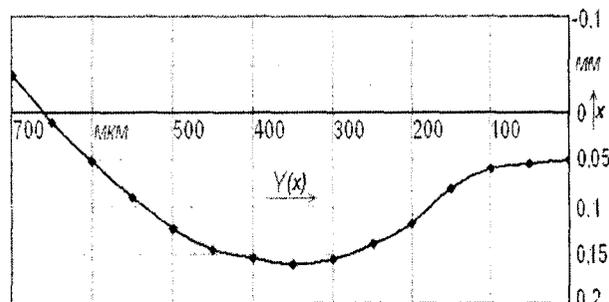
Вследствие малой жесткости технологической системы токарная обработка нежестких валов, является очень трудоемкой. Для устранения возникающих при обработке вибраций и погрешностей формы детали в поперечном и, особенно, в продольном сечениях, используют различные технологии, разработанные, как правило, для токарных станков с ручным управлением. Интенсификация токарной обработки таких валов, использование для нее станков с числовым программным управлением (ЧПУ) требуют разработки новых прогрессивных технологий, направленных на совершенствование процесса удаления припуска и, таким образом, на управление процессом формирования параметров точности продольного и поперечного сечений валов.

Эффективным способом повышения точности формы детали в ее продольном сечении является предсказание управляющих программ для станков с ЧПУ с учетом упругих деформаций элементов технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД). Управление процессом удаления припуска заключается в том, что резец в каждый момент времени получает дополнительно радиальное перемещение относительно детали на величину упругой деформации технологической системы. При этом траекторией движения режущей кромки резца является линия, эквидистантная линии упругой деформации детали в технологической системе. Основным достоинством такого способа управления процессом удаления припуска является возможность программирования траектории движения инструмента в технологической системе, установления более стабильного динамического процесса обработки деталей, управления процессом съема припуска. При этом не требуется модернизация металлорежущего станка, что приводит к повышению производительности и снижению трудоемкости процесса механической обработки [1].

Для этой цели предложена методика коррекции траектории движения инструмента при линейной аппроксимации кривой ожидаемых погрешностей. На схеме, представленной на рис. 1, видно, что при обработке без предсказания траектории режущего инструмента, величина упругих перемещений техно-

логической системы переменна в различных сечениях по длине обрабатываемого вала.

В результате анализа погрешностей выявлены их наследуемый характер и зависимость как от режима обработки, так и от способности технологической системы воспринимать возникающие при обработке силы резания, т.е. от ее жесткости. Последняя, в свою очередь, определяется конструктивными параметрами обрабатываемого вала (диаметром, длиной), параметрами жесткости узлов передней и задней бабок металлорежущего станка, а также принятой схемой базирования заготовки.



**Рис. 1. Графики обработки нежестких валов классическим способом**

При обтачивании гладкого вала кривая ожидаемых погрешностей обработки в продольном сечении описывается уравнением:

$$Y(x) = Y_{г.д.}(x) + Y_{д.}(x) + Y_{з.б.}(x) + Y_{п.}(x), \quad (1)$$

где  $Y_{п.б.}$ ,  $Y_{д.}$ ,  $Y_{з.б.}$ ,  $Y_{с.}$  – соответственно жесткость передней бабки, жесткость детали, жесткость задней бабки, жесткость суппорта станка.

В свою очередь, составляющие жесткости могут быть определены по известным формулам.

Жесткость передней бабки:

$$Y_{п.б.}(x) = P_y(x) \cdot \left[ \frac{1}{j_{п.б.}} \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $P_y(x)$  – радиальная составляющая резания;  
 $j_{п.б.}$  – жесткость передней бабки;

$x$  – координаты рассматриваемого сечения (расстояние от начала обработки вала до обрабатываемого сечения);

$L$  – длина вала.

Жесткость детали:

$$Y_{д.}(x) = P_y(x) \cdot \left[ \frac{x^2 \cdot (L-x)^2}{3 \cdot E \cdot J_{заг} \cdot L} \right], \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости детали;

$J_{заг}$  – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Жесткость задней бабки:

$$Y_{з.б.}(x) = P_y(x) \cdot \left[ \frac{1}{J_{з.б.}} \cdot \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $J_{п.б.}$  – жесткость передней бабки.

$$Y_{с.}(x) = \frac{P_y(x)}{j_c}, \quad (5)$$

где  $j_c$  – жесткость суппорта станка.

Радиальная составляющая резания определяется по формуле:

$$P = 3550 \cdot t_{\phi}^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot Kp \cdot \left( \frac{\sigma_{н}}{750} \right)^{0,75}, \quad (6)$$

где  $t_{\phi}$  – фактическая глубина резания, мм;

$s$  – подача при обработке, мм/об;

$v$  – скорость резания, м/мин;

$Kp$  – поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия резания;

$\sigma_{н}$  – условный предел прочности материала обрабатываемой заготовки.

Расчет предсказания траектории был выполнен на при помощи персонального компьютера (ПК) по следующей методике.

По формуле (1) были просчитаны значения ожидаемых погрешностей в ряде последовательных сечений с шагом  $L/10$ . По результатам расчета была получена траектория предсказания. Для упрощения вычислений была создана программа для создания управляющих программ для станков с ЧПУ с учетом упругих деформаций элементов технологической системы.

Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке с ЧПУ модели 16К20Ф3. Обрабатывались заготовки  $\varnothing 45 - 37$  мм и  $L = 700$  мм из стали 20 ГОСТ 1050-90. Обработка осуществлялась резцами, оснащенными твердосплавными четырехгранными пластинами Т15К6:  $\varphi = 45^\circ$ . Обработка заготовки проводилась при следующих технологических режимах:

- 1) глубина резания  $t = 1$  мм;
- 2) подача  $s = 0,2$  мм/об;
- 3) скорость резания  $v = 100$  м/мин.

Обработка проводилась без использования смазывающе-охлаждающих жидкостей. В процессе обработки наблюдалась вибрация из-за исходного искривления заготовки.

Обработанные заготовки были измерены в соответствующих сечениях, по результатам измерений были построены графики – рис. 2.

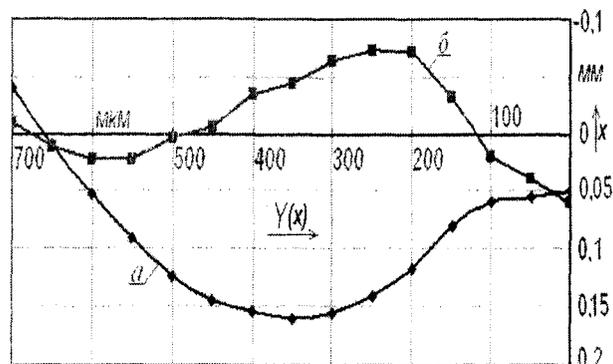


Рис. 2. Графики обработки нежестких валов: а – классический способ; б – с учетом упругих перемещений технологической системы

Из графиков видно, что погрешности, возникающие при механической обработке нежестких валов классическим способом на 52 % больше, чем погрешности, возникающие при обработке валов с учетом упругих перемещений технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД). Также было зафиксировано устранение возникающих при обработке вала вибраций и погрешностей формы детали в поперечном сечении.

Как видно из графиков, присутствует погрешность обработки у передней и задней бабок металлообрабатывающего станка, что свидетельствует об изношенности этих агрегатов.

Областями применения предложенного технического решения является механическая обработка деталей типа валов малой жесткости с прямолинейной и криволинейной образующей (в т.ч. винтов) и на токарных станках с ЧПУ. Предложенная методика коррекции траектории движения режущего инструмента при линейной аппроксимации кривой ожидаемых погрешностей может также являться теоретической базой для разработки систем автоматизированного прогнозирования качества обработки валов малой жесткости в САПР технологических процессов механической обработки поверхностей деталей.

#### Литература:

- 1 Мельников Г.Н. Управление точностью токарной обработки валов на базе явлений технологического наследования // Вестник МГТУ – №4. М.: Машиностроение, 1994. с. 89-96.
- 1 Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. – Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мецержакова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 412-41.

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.315.6.035.183:681.2

Асп., инженер-технолог Пронин В.В.

(ЗАО «ОРЛЭКС», СКБприбор, Орловский государственный технический университет)

г. Орел, тел. (4862)419566

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ОКСИДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПРИБОРНОЙ ПРОДУКЦИИ

*Researches of electric properties (voltage of breakdown) of coatings which are generated using technology micro-arc oxidation on aluminum alloy Д16Т are spent. Implication on results of research is as follows: micro-arc oxidation technology is applicable for manufacturing instrument insulating elements which are used to switch the AC and DC circuits with voltage up to 130V.*

Уровень свойств изделия определяется, в основном, качественными характеристиками его поверхности. При рассмотрении вопроса о возможности применения изоляционных покрытий для получения изделий, используемых в приборостроении в качестве несущих изоляционных элементов, электрическая прочность  $E_{пр}$  получаемого покрытия является важнейшей характеристикой, так как позволяет оценить способность диэлектрика противостоять разрушению электрическими силами. В исследованиях, проводимых ранее [1, 2], уже отмечалось о возможности использования оксидных керамических покрытий в качестве электроизоляционных. В данной работе возможности оксидных покрытий, сформированных с использованием технологии микродугового оксидирования (МДО) рассматриваются более детально. В исследованиях использовали цилиндрические образцы  $\varnothing 25$  мм и высотой 5 мм из алюминиевого сплава Д16Т. Оксидирование проводили в силикатно-щелочном электролите на основе КОН и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  со значением силикатного модуля  $m = 3,3$ .

Измерение электрической прочности проводили в соответствии с ГОСТ 6433.3-71. При измерениях использовали два латунных электрода цилиндрической формы. Площадь контакта каждого электрода  $79 \text{ мм}^2$ . Усилие контакта электродов с образцом составляло 10 кПа. Измерение электрической прочности проводили на переменном токе частотой 50 Гц, с использованием универсальной пробойной установки УПИ-3. Время нарастания напряжения составляло 10 с.

Исследования показали, что наибольшая толщина покрытия обеспечивается при повышенных концентрациях в электролите  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  и малом содержании щелочи (именно при этих условиях формируется покрытие толщиной 180...250 мкм), поэтому кривые зависимости пробойного напряжения от концентрации компонентов электролита, показанные на рис. 1, выглядят вполне предсказуемо. Они показывают большое различие показателей при  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} < 10$  г/л. Ее увеличение свыше 15 г/л ощутимо нивелирует различия, что объясняется нейтрализацией воздействия щелочи при

больших концентрациях жидкого стекла. Кроме того, большее количество вещества, находящееся в канале разряда при микродуговых разрядах (МДР), способствует интенсивному образованию окиси кремния, имеющей относительно высокое значение электрического сопротивления. Однако это приводит к росту показателей шероховатости и объемной пористости, растет неоднородность напряжения пробоя различных участков покрытия. Все это отражается на качественных характеристиках покрытия, о которых можно судить по удельным показателям. Электрическая прочность покрытия выше при большей концентрации щелочи ( $E_{пр} = 6,1$  кВ/мм при  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 5$  г/л,  $\text{C}_{\text{KOH}} = 5$  г/л (рис. 2)). Более плотные покрытия с меньшим количеством дефектов и с более монотонным распределением электрофизических свойств формируются при повышенных концентрациях щелочи (или более низкой концентрации  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Однако толщина подобных покрытий не превышает 60...80 мкм. Повышенное содержание в электролите  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  приводит к формированию покрытия с большим количеством дефектов, резко снижающих удельное пробойное напряжение ( $E_{пр} = 3,6$  кВ/мм при  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 20$  г/л,  $\text{C}_{\text{KOH}} = 1$  г/л). Это приводит и к большей неоднородности электрической прочности различных участков покрытия. Для оценки неоднородности использовали критерий  $K_U$ , учитывающий разницу напряжения пробоя в разных точках образца. Большее значение показателя соответствует более равномерному распределению.

$$\bar{E}_U = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  -- соответственно, наименьшее и наибольшее значения напряжения пробоя покрытия.

Как видно из рис. 3, напряжение пробоя при  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 30$  г/л значительно больше, чем при  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 5$  г/л (среднее значение  $U_{пр} = 1192$  В). Однако неоднородность распределения показателей при этом значительно возрастает  $K_U = 66,7\%$ . При  $\text{C}_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 5...10$  г/л  $K_U = 73...78\%$ . Улучшить показатель неравномерно-

сти можно при обработке в гальвано-динамическом принудительно падающем (ГДПП) режиме и времени обработки более 4 часов, однако повысить его свыше 80 % будет очень сложно. Этот режим также подходит лучше других для обработки деталей, имеющих сложный профиль (рис. 4).

На участках с большой толщиной покрытия при оксидировании могут создаваться условия для перехода отдельных МДР в дуговые разряды (ДР), плотность тока в которых очень высока, что может привести к сквозным прогарам. Поскольку электрическая прочность на участке с дефектом будет низка, то изделие

после сборки может быть забраковано. По этой причине требуется уделять особое внимание токовому режиму процесса МДО, избегая перехода МДР в ДР.

Повысить напряжение пробоя можно путем дополнительной обработки деталей в кислотном-щелочном электролите с последующей пропиткой в суспензии фторопласта вакуумным способом [3]. Но любая дополнительная операция повышает себестоимость изготовления и, принимая решение об использовании той или иной технологии в производстве это необходимо учитывать.

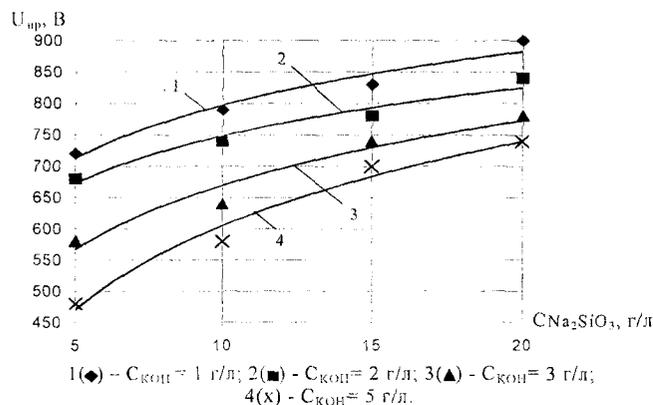


Рис. 1. Влияние концентрации  $Na_2SiO_3$  и  $KOH$  на напряжение пробоя покрытия на сплаве Д16Т. Режимы: начальная плотность тока  $I_S = 20 \text{ А/дм}^2$ ; время оксидирования  $T = 2 \text{ ч}$

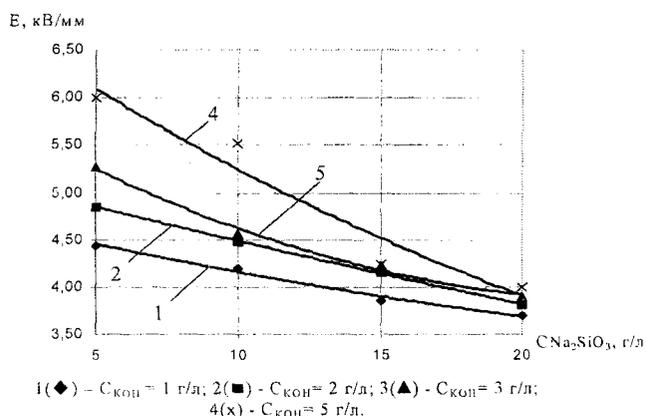


Рис. 2. Влияние концентрации  $Na_2SiO_3$  и  $KOH$  на электрическую прочность покрытия на сплаве Д16Т в ГДПП режиме при начальной плотности тока  $I_S = 20 \text{ А/дм}^2$  и времени оксидирования  $T = 2 \text{ ч}$

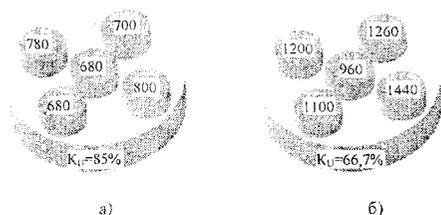


Рис. 3. Распределение напряжения пробоя покрытия по поверхности образца, сформированного на сплаве Д16Т в ГС режиме при  $I_S = 20 \text{ А/дм}^2$ , времени оксидирования  $T = 2 \text{ ч}$ . и  $C_{KOH} = 1 \text{ г/л}$ : а)  $C_{Na_2SiO_3} = 5 \text{ г/л}$ ; б)  $C_{Na_2SiO_3} = 30 \text{ г/л}$

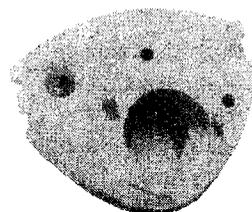


Рис. 4. Внешний вид колонки датчика-реле температуры ТАД101, изготовленной из сплава Д16Т и обработанной по технологии МДО

**Выводы**

Технологию МДО можно применять для производства изоляционных элементов приборов, используемых для коммутации цепей переменного и постоянного тока напряжением до 130 В;

Наилучших значений  $U_{пр}$  можно достигнуть при  $C_{KOH} = 1...2 \text{ г/л}$  и  $C_{Na_2SiO_3} = 20 \text{ г/л}$ . ( $U_{пр} = 840...900 \text{ В}$ ). Однако, принимая во внимание значение коэффициента  $K_U$ , следует применять электролит со значением  $C_{Na_2SiO_3} < 10 \text{ г/л}$ ;

Наблюдается четкая зависимость: больше толщина  $\Rightarrow$  больше напряжение пробоя  $\Rightarrow$  больше неоднородность распределения напряжения пробоя по поверхности.

**Литература:**

1 Тимошенко, А.В. Микродуговое оксидирование сплава Д16Т на переменном токе в щелочном электролите / А.В. Тимошенко, Б.К. Опара, А.Ф. Ковалев // Защита металлов. – 1991. – Т.27. – № 3. – С.417-424.  
 2 Пронин, В.В. Применение изоляционных оксидных покрытий в приборостроении / В.В. Пронин // Приборостроение 2004. Сб. тр. междунар. научно-техн. конф. – Винница-Ялта, 2004. – с. 415-416.  
 3 Пат. 2237758 РФ, МПК<sup>2</sup> С 25 D 11/06, 11/18. Способ получения термостойких изоляционных покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов / Новиков А.Н., Коломейченко А.В., Пронин В.В. – Оpubл. 10.10.04, Бюл. № 28. – 3 с.

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 338.1

Канд. экон. наук Степанова Е.Ю.

(Орловский государственный технический университет)

г. Орел, тел. (4862)416684, E-mail: [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)**МНОГОУРОВНЕВЫЕ СТРУКТУРЫ: КАЧЕСТВО,  
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ, ИННОВАЦИИ**

*Main trends in the modern economy of the country – creation of multilevel corporative structures are considered. The problems of competitiveness and quality provision, innovation introductions and ways for their solution in the companies are shown.*

Одним из ярких явлений в экономической жизни нынешней России является создание огромных многоуровневых и разветвленных корпоративных структур, из которых особый интерес представляют вертикально-интегрированные. Это явление, ранее всего отмеченное в нефтяной и газовой промышленности, захватывает новые отрасли промышленности: нефтехимию, цветную и черную металлургию, военно-, лесо- и агропромышленный комплексы, фармацевтику, машиностроение (авиационное, энергетическое и сельскохозяйственное), добычу и переработку природных алмазов и др. Вертикально-интегрированные компании создаются даже по производству и реализации продуктов интеллектуальной собственности.

Популярность вертикальных иерархических структур обусловлена российской спецификой, особенностями отдельных отраслей и производимых товаров. Вертикальная интеграция является результатом действия объективных причин, к которым, в первую очередь, можно отнести нестабильную экономическую ситуацию в стране, высокий уровень неопределенности, жесткую конкуренцию на внутреннем рынке, сильное давление со стороны зарубежных транснациональных корпораций и вытеснение ими отечественного производителя с внутреннего рынка, что определяет необходимость поиска новых путей и подходов к формированию и оптимизации организационных структур управления.

Создание вертикально-интегрированных структур позволяет объединять материальные, финансовые, интеллектуальные и другие ресурсы для решения многих задач, экономия на издержках, в первую очередь, на логистических операциях, получая дополнительные преимущества от стабильности поставок, создания рациональных технологических, хозяйственных и финансовых связей. Их формирование позволяет создать более благоприятный инвестиционный климат, более сильные конкурентные преимущества на внутреннем и внешнем рынках, обеспечить приобретение материальных и нематериальных активов, которые нельзя приобрести другими путя-

ми, обеспечивать лучшие условия повышения качества выпускаемой продукции.

Качество и цена потребления являются главными конкурентообразующими факторами товара [1, 2]. И хотя проблема обеспечения качества актуальна абсолютно для всех видов продукции, товаров и услуг на всем мировом пространстве, она особенно важна и стоит чрезвычайно остро перед отечественными производителями. За время социально-экономических преобразований последних лет утрачено многое из того, что было наработано в этой области в Советском Союзе. Пока европейские страны, Америка и Япония разрабатывали и внедряли системы менеджмента качества, наша страна более десятка лет занималась реформированием социально-экономической системы, сопровождающимся многими известными разрушительными для экономики последствиями. Было не до качества – лишь бы выжить.

Мировой опыт показывает, что решение проблем качества должно стать национальной идеей, носить всеобщий характер. Научно-технический прогресс в таких странах, как Япония, Южная Корея, Китай был предопределен прорывом именно в качестве, позволившим им резко увеличить свой экспорт и встать в строй лидеров мировой экономики.

Вместе с тем, в вертикально-интегрированных компаниях проблемы обеспечения качества выпускаемой продукции неизмеримо возрастают, так как требуется его поддерживать и контролировать на всех уровнях, этапах переработки, изготовления, транспортировки и т.д. Для обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции необходимо коренное обновление оборудования, переход на энерго- и ресурсосберегающие технологии с минимальным уровнем воздействия на окружающую среду, повышение степени информатизации, автоматизированного управления технологическими процессами и производством до мирового уровня. Особенно актуальны эти вопросы в условиях вступления во Всемирную торговую организацию. Учитывая, что до 90 % валового внутреннего продукта в России

сегодня создается на оборудовании, доставшимся из прошлого века, то на технологическое обновление потребуются колоссальные финансовые ресурсы. Это по силам только крупнейшим интегрированным структурам. Однако, если внутренние затраты в них превысят рыночные, то часто выгоднее эту продукцию или услугу купить в другой компании, т.е. использовать аутсорсинг. Проблема заключается в готовности для этого рыночной среды, эффективности решения задач национальной экономической безопасности и т.п.

В рыночных условиях понятие о качестве продукции имеет в большей степени экономическое значение, чем техническое, но не может быть реализовано без последнего. Улучшение качества продукции при неизменной себестоимости ведет к увеличению дохода и прибыли за счет расширения сбыта и увеличения объема продаж. Увеличение прибыли при неизменном доходе возможно за счет снижения себестоимости. Обычно повышение качества вызывает увеличение затрат, цены и снижение объема продаж. Производитель должен учитывать интересы потребителя, его желание иметь новый продукт с меньшей ценой потребления, чем прежняя, если он хочет увеличить свою прибыль за счет улучшения качества.

В настоящее время среди конкурентоспособности продукции цена уже не доминирует. Потребительские свойства продукции (функциональность и дизайн, надежность и долговечность, экономичность и безопасность) и уровень сервиса выходят на лидирующие позиции. Чтобы их обеспечить, требуется внедрение новых технологий, что позволяет делать машины и оборудование более производительными, простыми в управлении и безопасными. Они становятся более мощными, компактными, легкими, более удобными в работе. Передовые фирмы внимательно отслеживают все самые последние и значимые новинки на мировых рынках, тратят миллиарды долларов на создание инноваций. Глобальная конкуренция движет окружающий мир, не давая ему стоять на месте. Российские компании должны учитывать ускорение протекания экономических процессов. Запоздалая реакция на изменение внешней среды может привести их к гибели.

Интересен факт [3], что для компаний, создавших за предыдущие пять лет большее количество новых видов продукции, вероятность достижения успеха в последующие пять лет увеличивается в два раза, чем для компаний, которые не проводят активной политики создания инноваций

Для обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке многоуровневые интегрированные структуры направляют большой объем инвестиций на научно-исследовательские и опытно-конструк-

торские работы (НИОКР), создание интеллектуальной собственности. Например, южнокорейская промышленная группа LG намерена до 2008 г. инвестировать в развитие своего химического производства 2,35 млрд. долларов. Причем большая часть – на НИОКР. Соотношение расходов на НИОКР к объемам продаж увеличится к 2008 году с нынешних 2,5 % до 5 % [4]. Компании Hewlett Packard и IBM инвестируют ежегодно в НИОКР по 4 млрд. долларов, обладая портфелем патентов соответственно 40000 и 17000 штук [5]. Крупнейшие компании России имеют, как правило, несколько сотен патентов [6], что в несколько раз меньше, чем у многих отечественных вузов. Это говорит о недостаточном внимании производителей к разработке новой продукции и ее патентной защите.

Вклад научно-технического прогресса в прирост валового внутреннего продукта наиболее развитых стран составляет по различным оценкам примерно от 80 до 95 %. Германия инвестирует на научные исследования 2,5 % ВВП, США – 2,67 %, Япония – 3,12 %. Россия тратит на науку в 5 раз меньше, чем Германия, и в 25 раз меньше, чем США [6]. Сложившаяся благоприятная для нашей страны конъюнктура на международном топливном рынке дает шанс изменить это положение в лучшую сторону.

Опыт развитых стран показывает, что повсеместно активизируются интеграционные процессы, дающие синергетические эффекты за счет координации усилий государства и бизнеса, науки и промышленности, науки и образования. Крупный отечественный бизнес, к которому относятся и многоуровневые компании, должен не упускать из вида изменения, происходящие в мировой экономике, и активно использовать их в целях обеспечения качества и конкурентоспособности своей продукции.

#### Литература:

- 1 Окрепилов В. В. *Управление качеством [Текст] : Учебник для вузов / В.В. Окрепилов. – М.: ОАО «Изд-во «Экономика», 1998. – 639 с.*
- 2 Минько Э. *Качество и конкурентоспособность [Текст] / Э. Минько, М. Кричевский. – СПб.: Питер, 2004. – 272 с.*
- 3 Никитин С.А. *Совершенствование управления технологией и конкурентоспособность предприятия [Текст] / С. А. Никитин, М. В. Козлов. – СПб.: Питер, 2004. – 305 с.*
- 4 Степанова Е.Ю. *Управление реструктуризацией экономики / Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Управление-98». – М.: ГУУ, 1998. – С. 83-86.*