

Редакционный совет:

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

Главный редактор серии:

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

Заместители главного редактора:

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

Редколлегия:

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

Ответственный за выпуск:

Григорьева О.Ю.

Адрес редколлегии серии:

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-03
www.ostu.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе
по надзору в сфере связи массовых
коммуникаций. Свидетельство: ПИ
№ ФС77-35719
от 24 марта 2009 года

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

© ОрелГТУ, 2010

Содержание

Механика

<i>Гоголев И.Г., Дроконов А.М., Николаева Т.А.</i> Способы снижения виброакустической активности опорных подшипников скольжения.....	3
<i>Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А.</i> Особенности математической модели электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор.....	8
<i>Желтков В.И., Цудиков М.Б., Чан Тхань Хай</i> Динамический анализ переносных опор системы видеомониторинга.....	14
<i>Устименко Д.А., Климов А.В.</i> Возможность возникновения виброударного режима шарикоподшипника.....	18

Машиностроение и металлообработка

<i>Осадчий В.Я., Дмитриев В.Д., Гончар О.А., Клецов В.Ф.</i> Исследование процесса раскатки грата с целью повышения качества труб из ферритных и аустенитных сталей.....	22
<i>Амбросимов С.К., Большаков А.Н.</i> Исследование динамики процесса резания при выходе зуба из зоны обработки при фрезеровании.....	29
<i>Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Москвитин С.А., Мальцев Д.Н.</i> Пластический изгиб трубы с деформируемым сечением.....	35
<i>Киричек А.В., Мальцев А.Ю.</i> Расчет мгновенной площади пятна контакта инструмента и заготовки при ротационной вытяжке коллаков масляных фильтров.....	39
<i>Козлов А.М., Болгов Д.В.</i> Технология совмещенной обработки отверстий.....	42
<i>Хромов В.Н., Корнев В. Н., Родичев А. Ю.</i> Технология и оснастка для изготовления биметаллического подшипника скольжения.....	45

Моделирование технологических процессов

<i>Гончаров С.В.</i> Методика исследования АПК, изготавливаемых методом центробежного формирования.....	50
<i>Комаров В. М., Ефимова П.Е.</i> Математическая модель распределения заказов в автоматизированной системе технологической подготовки производства на предприятиях авиационной промышленности.....	57
<i>Петрешин Д.И.</i> Разработка контроллера сопряжения ПЭВМ-УЧПУ для самообучающейся технологической системы.....	63
<i>Телегин В.В.</i> Компьютерное моделирование динамических процессов в механизмах кузнечно-штамповочного оборудования.....	67
<i>Тинькова А.В., Кобелев Н.С.</i> Математическое моделирование гидродинамических процессов в эластичных трубопроводах.....	74

Приборостроение и системы управления

<i>Корндорф С.Ф., Уткин Г.И., Марков В.В.</i> Разрушение разъемных контактов в процессе их замыкания.....	78
<i>Подмастерьев К.В., Козора А.В.</i> Генератор тестовых сигналов для поверки и сертификационных испытаний электрокардиоаппаратуры.....	82
<i>Лисичкин В.Г., Шведов С.Н.</i> Повышение точности многопараметровых приборов контроля с резонансным преобразованием.....	88
<i>Смоляков А.П.</i> Устройство для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи.....	96

Испытания, контроль, диагностика, мониторинг

<i>Клюев С.В., Шкатов П.Н.</i> Исследование возможности оценки коррозионного состояния толстостенных ферромагнитных объектов вихретоко-магнитным методом.....	103
<i>Куликов С.С.</i> Математическое моделирование электромагнитных процессов при вихретоковой дефектоскопии бурильных труб из алюминиевых сплавов.....	109
<i>Пахолкин Е.В.</i> О комплексном исследовании адгезионной способности смазочных материалов электрическим методом.....	114
<i>Суздальцев А.И., Петров С.П., Сафронова Н.А.</i> Об одном методе оценки качества технических систем, характеризующихся разнородными свойствами и показателями качества.....	120
<i>Бакурова Ю.А.</i> Термоэлектрический метод раздельного определения средних температур в зонах трения передней и задней поверхностей реза в процессе резания.....	125



Scientific and technical journal
of Orel State Technical University
The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 1/279(592) 2010

January-February

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The State Higher Education Professional Institution
Orel State Technical University

Editorial council:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president

Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president

Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof.

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants:

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Editorial Committee

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.

Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.

Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.

Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS

Korndorf S.F. Doc. Sc. Tech., Prof.

Malinin V.G. Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.

Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.

Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition:

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
Nauorskoye Chaussee, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-21

www.ostu.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal
Department for Mass
Communication. The certificate of
registration ПИ № ФС77-35719
from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa
Rossii» 29504

© OSTU, 2010

Contents

Mechanics

<i>Gogolev I.G., Drokonov A.M., Nikolaeva T.A.</i> Ways to reduce vibroacoustic activity of supporting bearings.....	3
<i>Kosmodamianskiy A.S., Vorobyev V.I., Pugachev A.A.</i> Features of mathematical model of the electric drive with two asynchronous engines, one of which contain rotary stator.....	8
<i>Zheltkov V. I., Tscudicov M.B., Tran Thanh Hai</i> Dynamic analysis for the portable handhelds of videomonitoring systems.....	14
<i>Ustimenko D.A., Klimov A.V.</i> Potencial arising vibroimpact regim ball-bearing.....	18

Engineering and metalworking

<i>Osadchiy V.Ja., Dmitriev V.D., Gonchar O.A., Klestov V.F.</i> Investigation of roll-out process of inner burr to improve the quality of ferritic and austenitic steels tubes.....	22
<i>Ambrosimov S.K., Bol'shakov A.N.</i> Research of dynamics of process of cutting at the exit of the tooth from the zone of processing at milling.....	29
<i>Vdovin S.P., Mikhailov V.N., Maltsev D.N.</i> Plastic bend of pipe with deformable section.....	35
<i>Kirichek A.V., Maltsev A.Y.</i> Calculation of the instant area of the stain of contact of the tool and preparation at the rotary drawing of caps of oil filters.....	39
<i>Kozlov A.M., Bolgov D.V.</i> Technology of fetch filtering of tools.....	42
<i>Chromov V.N., Korenev V.N., Rodichev A.U.</i> Technology and equipment for manufacturing of the bimetallic friction bearing.....	45

Modeling engineering processes

<i>Goncharov S.V.</i> Technique of research of the reinforced polymeric composites made by the method of centrifugal formation.....	50
<i>Komarov V. M., Ejimova P. E.</i> Mathematical model of automated system order distribution within production technological preparation process in aviation enterprises.....	57
<i>Petreshin D. I.</i> Working out of the controller of interface pc-cnc for self-trained technological system.....	63
<i>Telegin V. V.</i> Computer modeling of dynamic processes in mechanisms of press-forging equipment.....	67
<i>Tin'kova A.V., Kobelev N.S.</i> Mathematical modelling hydrodynamic processes in rubber-band pipe line.....	74

Instrument Engineering

<i>Korndorf S.F., Utkin G.I., Markov V.V.</i> Destruction of disjoin contacts in the process of they circuit.....	78
<i>Podmasteriev K.V., Kozura A.V.</i> Generator for electrocardiographic devices metrological and certification tests.....	82
<i>Lisichkin V.G., Shvedov S.N.</i> Increase of accuracy of multiple parametre control devices with resonant transformation.....	88
<i>Smolyakov A.P.</i> Device for transfer of signals of the disturbing messages on the engaged digital channels of communication.....	96

Tests, control, diagnostics, monitoring

<i>Kluev S.V., Shkatov P.N.</i> Research of possibility of the estimation of the corrosion condition of thick-walled ferromagnetic objects by the combined eddy-current and magnetic method.....	103
<i>Kulikov S.S.</i> Mathematical modeling of electromagnetic processes at eddy current testing of light alloy drill pipes.....	109
<i>Pakholkina E.V.</i> About complex probe of adhesive ability of greases by the electric method.....	114
<i>Suzdaltsev A. I., Petrov S. P., Safonova N. A.</i> About one method of estimation of quality of the technical systems characterised dissimilar by properties and indicators of quality.....	120
<i>Bakurova J.A.</i> The thermoelectric method of measure through average temperature fore end back surface of cutter.....	125

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

УДК 621.438

И.Г. ГОГОЛЕВ, А.М. ДРОКОНОВ, Т.А. НИКОЛАЕВА

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассмотрены условия работы опорных подшипников скольжения турбомашин. Приведены способы снижения их виброактивности в процессе проектирования и эксплуатации энергоблоков.

Ключевые слова: турбомашинa, опорный подшипник, масляный слой, вибрация, шум.

The conditions of the reference turbine bearings. Discusses ways to reduce and vibroaktivnosti in the process of designing and operating power plants.

Key words: turbomachinery, support bearing, oil layer, vibrations and noise.

Создание новых видов техники с форсированными параметрами (по скорости, мощности, нагрузкам), разработка высокоэффективных форм производства и интенсификация действующих технологических процессов, наряду с увеличением уровня генерируемого звукового давления, часто сопровождаются ростом импульсных шумов, расширением спектра излучаемой акустической мощности, что создает значительные нагрузки на организм сотрудников таких предприятий, а также жителей прилегающих селитебных территорий.

Даже относительно низкие уровни шума зачастую сочетаются с воздействием сопутствующего вредного фактора - вибрации, что существенно усугубляет условия труда обслуживающего персонала, снижает долговечность продукции машиностроения.

Рассматриваемые явления наиболее характерны для современных энергетических установок, а потому разработка конструктивных мероприятий по шумоглушению и виброизоляции применительно к турбоблокам становится актуальной задачей для организаций, занимающихся как их созданием, так и эксплуатацией.

В турбомашинax различного класса и назначения интенсивными источниками механической вибрации и шума являются опорные подшипники.

Рассмотрим физические явления, генерирующие нестационарные процессы в смазывающем слое высоконагруженных подшипников скольжения.

Основная причина шума и вибрации, создаваемых опорами скольжения энергоблоков – наличие сил трения между поверхностями вкладыша и шейки вала, возникающих в результате неравномерности и нестационарности процесса смазки. При этом возникает контакт металлических поверхностей и появляется "скрип" в результате скачкообразного движения шейки вала и поверхности опоры.

Механизм образования самовозбуждающихся колебаний в смазывающем слое заклю-

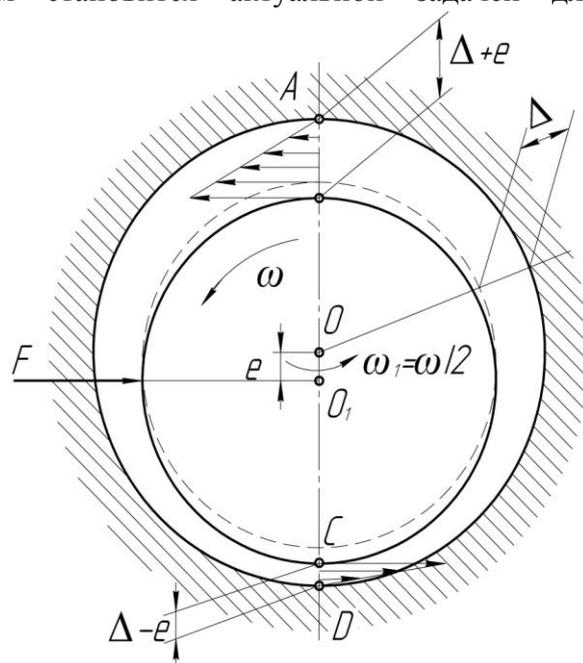


Рисунок 1 – Схема возникновения масляной вибрации

чается в следующем. Если в определенный момент под действием случайной силы шейка сместится на величину "e" (рисунок 1), то расход масла через сечения АВ и СД изменится. Разность его объемных расходов сосредоточится слева от этих сечений, а так как масло жидкость несжимаемая, то в этой области возникает повышенное давление (циркуляционная сила F), за счет чего шейка вала сместится вправо (повернется вокруг точки О с определенной скоростью ω_1). При этом уменьшится правый боковой зазор и образуется сила, действующая вверх, которая сократит верхний зазор и т.д..

Таким образом, из-за случайного сдвига ротор начнет непрерывно перемещаться, создавая самоподдерживающуюся прецессию, вызывающую интенсивные низкочастотные вибрации, не кратные частоте вращения валопровода.

Средняя частота вращения смазочного слоя, примерно равная половине частоты вращения вала, является частотой его прецессии в зазоре подшипника. Совместное действие этой вибрации с вибрацией частоты вращения ротора создает резонансные биения, являющиеся одновременно источником интенсивного звукоизлучения.

Так как основным источником шума и вибрации опор скольжения является неравномерное распределение смазочного слоя, то необходимо обеспечить в период всего эксплуатационного цикла установки обильную смазку, которая в значительной степени зависит от "модуля подшипника" (M):

$$\dot{l} = \frac{\mu \cdot n}{P},$$

где μ – динамическая вязкость смазывающего агента;
 P – среднее давление на подшипник;
 n – частота вращения.

На рисунке 2 схематически изображена зависимость коэффициента трения f в масляном слое от "модуля подшипника", иллюстрирующая область разрыва слоя смазки, в которой возникают колебания опорного узла турбомашин на резонансной частоте. Градиент изменения этой характеристики и разрыв в месте обильной смазки существенно зависят от величины зазора между шейкой вала и вкладышем. Рассматриваемое явление может быть исключено поддержанием в узле смазки параметров, обеспечивающих достаточный уровень модуля M .

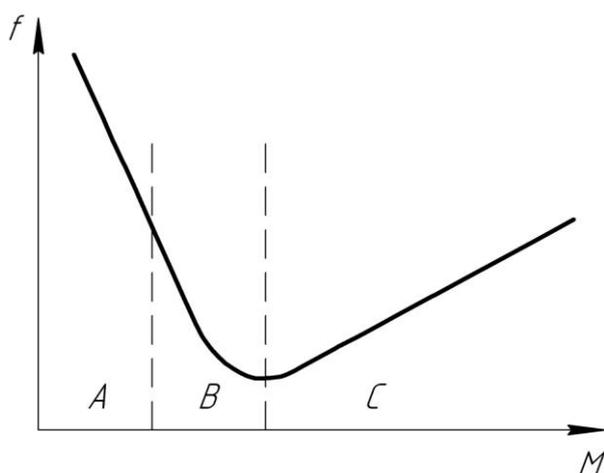


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения f от модуля M : А – область тонкого слоя смазки; В – область перехода; С – область обильной смазки

Следует отметить, что и при достаточном объеме поступающей смазки возможен разрыв пленки, если опорный блок турбомашин подвержен колебаниям. В этих условиях даже при повышенной нагрузке на шейку вала устойчивость процесса смазки можно обеспечить посредством оптимизации геометрии канавок на поверхности вкладыша с целью лучшего распределения смазочного материала вдоль опорной поверхности подшипников.

Потеря динамической устойчивости роторов в опорных блоках может быть результатом действия и ряда других факторов.

Как показал опыт эксплуатации турбоустановок, несущая способность подшипника снижается при: перекосах вала

вследствие несимметричной деформации корпусов при их конструктивной или технологической асимметрии, а также неточной установки опорного узла относительно оси агрегата (рисунок 3); неперпендикулярности опорной и упорной поверхностей ротора; неправильном выборе марки масла, низком его качестве (обводнении, аэрации и др.) или изменении рабочей температуры, что отразится на вязкости и демпфирующих свойствах

смазывающего агента; возрастании неуравновешенных аэродинамических сил в проточной части турбомашин.

Принято считать, что наличие дисбаланса, как и гранность шейки вала, преимущественно создают вибрационный спектр на частоте вращения вала.

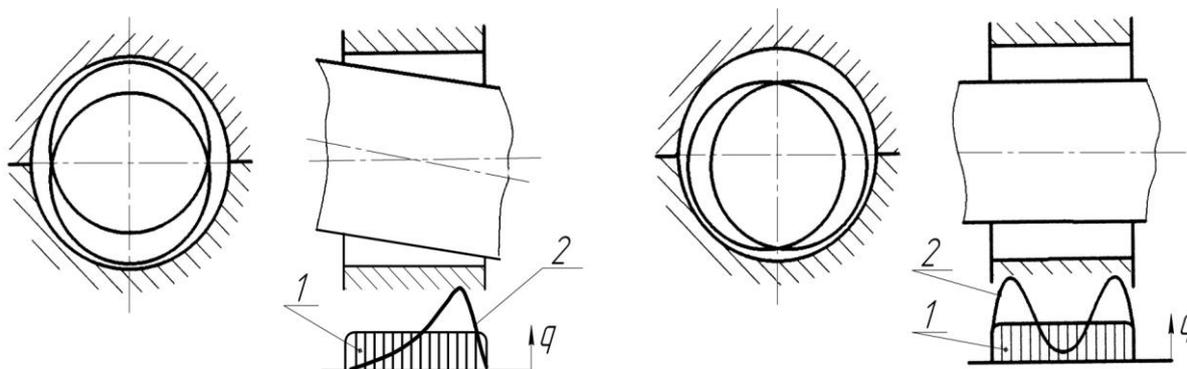


Рисунок 3 – Работа опорного подшипника с перекосом:
а – перекосом в вертикальной плоскости; б – то же, в горизонтальной;
1 – эпюра удельных давлений q без перекоса; 2 – то же, с перекосом

Принято считать, что наличие дисбаланса, как и гранность шейки вала, преимущественно создают вибрационный спектр на частоте вращения вала.

Отклонение в подшипнике величины радиальных зазоров от расчетных значений может привести к задеваниям вращающихся деталей за неподвижные, вызывающим ударные импульсы и временное изменение жесткости опор скольжения, что сопровождается их локальным разогревом, разрывом сплошности пленки, деформацией рабочих поверхностей.

Даже в условиях, когда амплитуда колебаний не превосходит величины диаметрального зазора в подшипнике, в роторе создаются значительные изгибающие нагрузки, часто вызывающие задевания элементов проточной части турбомашин, что свидетельствует об опасности самовозбуждающихся колебаний на масляном слое.

Американскими исследователями установлено, что при определенной частоте вращения возможны резонансные явления вследствие образования в масляном слое «вихревой смазки», а при дальнейшем увеличении оборотов – «взбиваемой смазки».

«Вихревая смазка» формируется под влиянием физических явлений, протекающих в масляном окружении, вызывая интенсивную вибрацию вала с частотой примерно равной половине рабочей частоты вращения, что близко к критическому режиму работы гибких роторов. Эти процессы имеют тенденцию перестраиваться при изменении окружных скоростей и параметров смазывающего агента.

Наибольшая виброактивность такого рода наблюдается в малонагруженных опорах скольжения при повышенных диаметральных зазорах (более 0,18мм). Одной из причин недостаточной нагруженности отдельных подшипников в многоопорных роторах является нарушение их центровки, например за счет тепловых деформаций элементов корпуса и фундамента.

При нагружении вала возникает дополнительная вертикальная сила, противодействующая влиянию "вихревой смазки", что снижает виброактивность ротора. Такого эффекта можно добиться посредством изменения условий работы подшипника и его конструкции (замена масла, изменение его давления) и модернизацией конструкции опорного узла.

Так, повышенное давление масла оказывает существенное влияние на толщину пограничного слоя, снижая прецессию ротора на частоте, соответствующей половине рабочей частоты вращения валопровода. Как видно из рисунка 4, наиболее эффективно можно управлять процессом вихревой вибрации варьируя величину давления масла в диапазоне $P_m = 0,12...0,16$ МПа.

В тех случаях, когда работа установки при повышенном давлении масла недопустима вследствие его значительных утечек, следует с целью регулирования уровня смазывающего агента в подшипнике предусмотреть установку дросселя в масляном канале (рисунок 5). Его рациональное расположение в кольцевой полости опоры скольжения позволит в значительной мере сократить амплитуду колебаний вала.

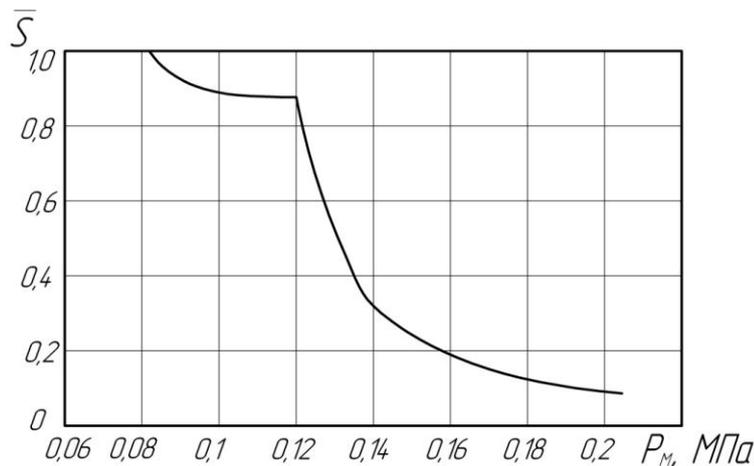


Рисунок 4 – Влияние давления P_m масла подшипника на амплитуду вибрации \bar{S} (относительно амплитуды, возникающей при вихревой смазке) при нормальном уровне давления смазки 0,085 МПа

опорного узла, а далее, с увеличением оборотов и нагрузки, ротор при режиме самовозбуждения масляного клина начинает смещаться к опорной поверхности. При «вихревой смазке» траектория движения шейки вала в подшипнике скольжения близка к круговой, а при «взбиваемой смазке» – орбита эллипсовидная.

Определенное влияние на характер вибрации опорных систем оказывают конструктивные характеристики их корпусов, так как последним свойственна различная жесткость (анизотропность) в вертикальном и горизонтальном направлениях. Нелинейная жесткость приводит к нарушению пропорциональности между возмущающими усилиями и деформацией.

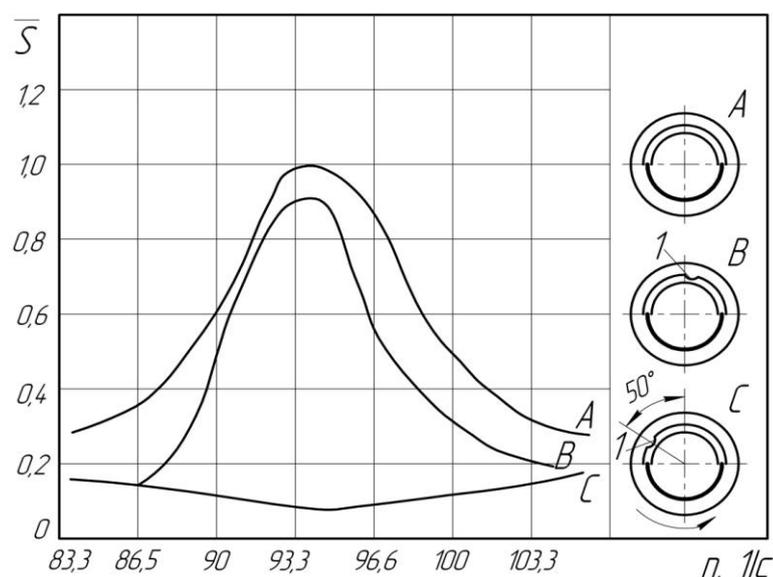


Рисунок 5 – Зависимость относительной амплитуды вибрации \bar{S} при использовании масляного дросселя (A – исходный вариант подшипника; B – неправильная установка дросселя; C – оптимальный вариант установки дросселя); 1 – масляный дроссель

Самовозбуждающиеся колебания типа «взбиваемая смазка» наблюдаются в турбинах с гибкими роторами на частотах вращения, как правило, вдвое и более превышающими первую критическую частоту.

Рассматривая среднее положение центра вала подшипника, следует отметить, что начало неустойчивого режима работы возможно при его расположении в области центра

Существенной анизотропностью обладает и слой смазочного материала: вертикальная жесткость масляной пленки приблизительно в десять раз выше горизонтальной.

В опорных узлах нелинейность может образоваться и за счет различных повреждений, например при отрыве опорной поверхности корпуса подшипника от фундаментной плиты и др., что вызывает наклеп и перегрев посадочных мест, разрушение и отслаивание баббитового слоя т.д.

В значительной мере сократить влияние изложенных деструктивных дефектов на виброакустические характеристики опорных подшипников скольжения можно посредством конструктивного совершенствования масляных камер.

Так, применение овальной (лимонной) расточки вкладыша (рисунок 6, а) способствует стаби-

лизации положения вала и снижению вибрации, в сравнении с круговой расточкой, за счет демпфирования колебаний верхним и нижним масляными клиньями.

Смещенная расточка (рисунок 6, б) способствует созданию верхнего поджимающего клина, также оказывающего позитивное влияние на стабилизацию положения ротора в подшипнике.

Трехклиновый подшипник (рисунок 6, в) за счет развиваемого давления в профилированных клиновидных каналах обладает высокими демпфирующими свойствами, за счет чего формируются силы, препятствующие появлению интенсивной вибрации.

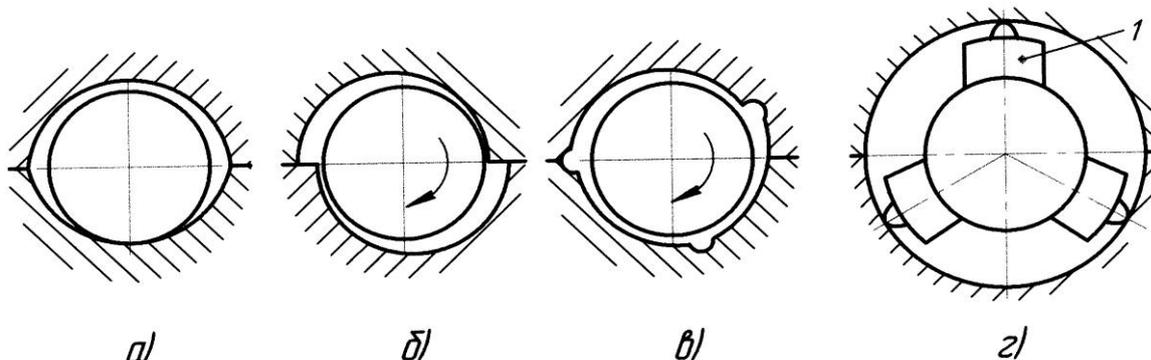


Рисунок 6 – Конструкции вкладышей подшипников:
 а) овальная; б) круговая смещенная;
 в) трехклиновая профилированная; г) с сегментами 1

В турбинах большой мощности следует использовать сегментные подшипники (рисунок 6, г), в которых шейка вала располагается между несколькими самоустанавливающимися сегментами, что препятствует потере устойчивости вращения вала на масляной пленке.

Эффективным следует считать вариант подшипников гидростатического типа, в которых непрерывная подача масла повышенного давления облегчает процесс запуска турбоблока вследствие стабильного положения вала в зазорах машины и существенно сокращает возможность возникновения самовозбуждающихся колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по контролю промышленных шумов/ Под редакцией В.В.Клюева. - М.: Машиностроение, 1979. -447с.

Гоголев Иван Григорьевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
 Д-р техн.наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета (БГТУ)
 241035, г. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, д.7
 Тел. 8- (4832) 51-84-80

Дроконов Алексей Михайлович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
 Канд.техн.наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета (БГТУ)
 241035, г. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, д.7
 Тел. 8-(4832)- 51-84-80

Николаева Татьяна Алексеевна

Брянский государственный университет, г. Брянск
 Д-р пед.наук, профессор кафедры БЖД Брянского государственного университета (БГУ)
 8-(4832) 58-82-34

А.С. КОСМОДАМИАНСКИЙ, В.И. ВОРОБЬЕВ, А.А. ПУГАЧЕВ

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВУМЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ, ОДИН ИЗ КОТОРЫХ СОДЕРЖИТ ПОВОРОТНЫЙ СТАТОР

В статье представлена разработанная на основе положений теории электромеханического преобразования энергии математическая модель электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор. Показаны отличия модели по сравнению с моделями однодвигательных электроприводов. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, поворотный статор, математическая модель электропривода.

In the article the mathematical model electric drive with two asynchronous motor, one of them have the rotary stator, is presented. This model is developed with principles of theory of electromechanical energy transformer. The model differences on relation of one-motor electric drives models are describes. The results of theoretical and experimental research are submitted.

Key words: electric drive, asynchronous motor, rotary stator, mathematical model electric drive.

Анализ публикаций, посвященных разработкам математических моделей электроприводов с асинхронными двигателями и методам их преобразований, показывает, что данная проблема является по-прежнему актуальной [3]. Достижения вычислительной техники, ее программного обеспечения, методов математического описания переходных электромагнитных и электромеханических процессов в полупроводниковых преобразователях и асинхронных машинах, позволяют синтезировать математические модели электроприводов различных видов и конфигураций.

В данной статье приводится математическая модель электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор, при его питании от трехфазной сети переменного тока. Схема включения такого электропривода приведена на рисунке 1.

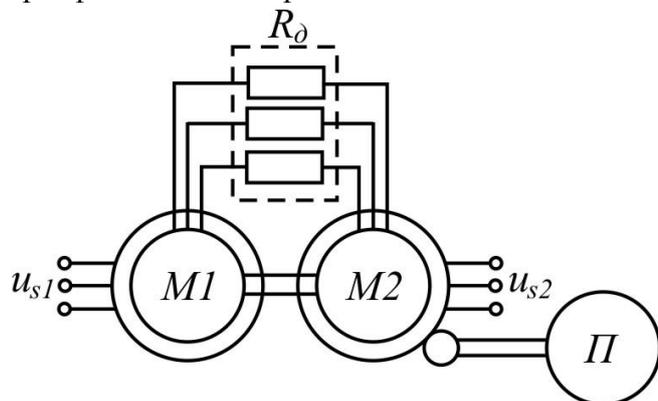


Рисунок 1 – Схема включения электропривода

В электроприводе используются два одинаковых асинхронных двигателя ($M1$ и $M2$) с фазными роторами, соединенных общим валом. Номинальная мощность каждого двигателя равняется половине мощности, требуемой механизмом в номинальном режиме работы. Статорные обмотки двигателей присоединены параллельно к общему источнику переменного напряжения u_{s1} , u_{s2} , а роторные обмотки соединены последовательно (возможно соединение через добавочные сопротивления R_d). Статор двигателя $M2$ поворачивается при помощи вспомогательного привода P .

Для описания переходных электромеханических процессов в данном электроприводе принят за основу двухполюсный асинхронный двигатель как идеализированная электрическая машина переменного тока. Оси координат обобщенной машины обозначены через α , β и все величины дифференциальных уравнений описаны в терминах этой системы координат.

Пространственная двухфазная модель электропривода приведена на рисунке 2. Здесь оси $\alpha 1$, $\beta 1$ связаны с неподвижным статором, оси $\alpha 2$, $\beta 2$ связаны с поворотным статором.

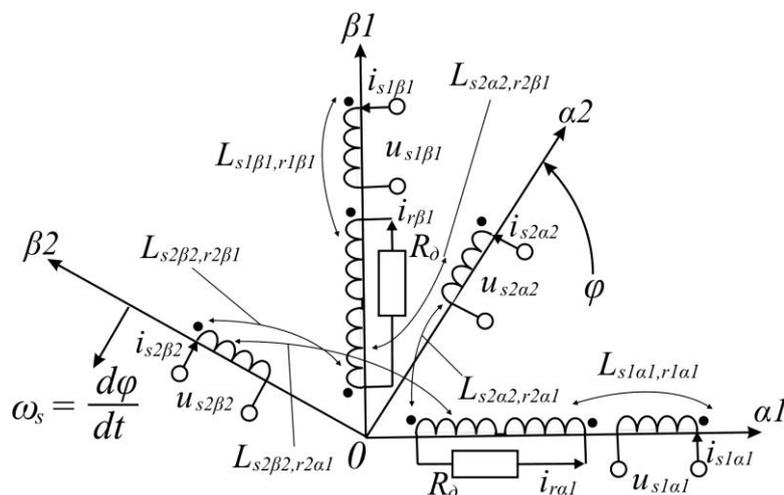


Рисунок 2 – Пространственная двухфазная модель электропривода

Дифференциальные уравнения электрического равновесия обмоток статоров и роторов в соответствии с пространственной двухфазной моделью электропривода (рисунок 2), а также вторым законом Кирхгофа и законом электромагнитной индукции, имеют следующий вид:

$$u_{s1(\alpha 1, \beta 1)} = R_s i_{s1(\alpha 1, \beta 1)} + \frac{d\psi_{s1(\alpha 1, \beta 1)}}{dt} \mp \omega_k \psi_{s1(\beta 1, \alpha 1)}; \quad (1)$$

$$u_{s2(\alpha 2, \beta 2)} = R_s i_{s2(\alpha 2, \beta 2)} + \frac{d\psi_{s2(\alpha 2, \beta 2)}}{dt} \mp (\omega_k - \omega_s) \psi_{s2(\beta 2, \alpha 2)}; \quad (2)$$

$$0 = R_{r\Sigma} i_{r(\alpha 1, \beta 1)} + \frac{d\psi_{r1(\alpha 1, \beta 1)}}{dt} + \frac{d\psi_{r2(\alpha 1, \beta 1)}}{dt} \mp (\omega_k - \omega_r) (\psi_{r1(\beta 1, \alpha 1)} + \psi_{r2(\beta 1, \alpha 1)}), \quad (3)$$

где ω_k , ω_s , ω_r – электрические частоты вращения осей координат, статора и ротора соответственно, причем $\omega_s = d\phi/dt$ (ϕ – угол поворота статора);

$u_{(s1,s2)(\alpha 1 \dots \beta 2)}$, $i_{(s1,s2)(\alpha 1 \dots \beta 2)}$, $i_r(\alpha 1, \beta 1)$, $\psi_{(s1,s2)(\alpha 1 \dots \beta 2)}$, $\psi_{(r1,r2)(\alpha 1, \beta 1)}$ – проекции напряжений, токов и потокосцеплений статоров и роторов на соответствующие оси;

R_s , $R_{r\Sigma}$ – сопротивления обмоток статоров и полное сопротивление цепи роторов соответственно.

Анализируя выражения (1) – (3) и рисунок 2, можно сделать заключение о том, что обе машины имеют механическую и электрическую по цепи ротора связи, в магнитном же отношении они являются развязанными. Роторные обмотки асинхронных машин соединены между собой последовательно, следовательно, уравнения обобщенного электромеханического преобразователя включают не $2m+2n$ уравнений, где m и n – число обмоток на статоре и роторе соответственно, а $2m+n$ уравнений напряжений. В связи с этим решить данную систему относительно потокосцеплений не представляется возможным. Для составления математической модели был осуществлен переход от потокосцеплений к токам, протекающим по обмоткам машин. Потокосцепление каждой обмотки определяется результирующим действием токов всех магнитосвязанных обмоток машины с данной обмоткой. С учетом рисунка 2 запишем выражения для потокосцеплений $\psi_{s1\alpha 1 \dots r2\beta 1}$ обмоток двигателей:

$$\psi_{s1\alpha 1} = L_s \cdot i_{s1\alpha 1} + L_{s1\alpha 1, r1\alpha 1} \cdot i_{r\alpha 1}; \quad (4)$$

$$\psi_{s1\beta 1} = L_s \cdot i_{s1\beta 1} + L_{s1\beta 1, r1\beta 1} \cdot i_{r\beta 1}; \quad (5)$$

$$\psi_{s2\alpha 2} = L_s \cdot i_{s2\alpha 2} + L_{s2\alpha 2, r2\alpha 1} \cdot i_{r\alpha 1} + L_{s2\alpha 2, r2\beta 1} \cdot i_{r\beta 1}; \quad (6)$$

$$\psi_{s2\beta 2} = L_s \cdot i_{s2\beta 2} + L_{s2\beta 2, r2\beta 1} \cdot i_{r\beta 1} + L_{s2\beta 2, r2\alpha 1} \cdot i_{r\alpha 1}; \quad (7)$$

$$\psi_{r1\alpha 1} = L_r \cdot i_{r\alpha 1} + L_{r1\alpha 1, s1\alpha 1} \cdot i_{s1\alpha 1}; \quad (8)$$

$$\psi_{r1\beta1} = L_r \cdot i_{r\beta1} + L_{r1\beta1,s1\beta1} \cdot i_{s1\beta1}; \quad (9)$$

$$\psi_{r2\alpha1} = L_r \cdot i_{r\alpha1} + L_{r2\alpha1,s2\alpha2} \cdot i_{s2\alpha2} + L_{r2\alpha1,s2\beta2} \cdot i_{s2\beta2}; \quad (10)$$

$$\psi_{r2\beta1} = L_r \cdot i_{r\beta1} + L_{r2\beta1,s2\alpha2} \cdot i_{s2\alpha2} + L_{r2\beta1,s2\beta2} \cdot i_{s2\beta2}, \quad (11)$$

где L_s, L_r – собственные индуктивности обмоток статоров и роторов соответственно;

L_{ij} – взаимные индуктивности, $i = s1\alpha1 \dots r2\beta1, j = s1\alpha1 \dots r2\beta1$.

В уравнениях (4) – (11) подстрочным индексом i показано в какой обмотке наводится ЭДС, подстрочным индексом j указывается током какой обмотки она создается.

При работе машины меняется взаимное положение обмоток статоров двух машин. Математическое описание работы электропривода в двухфазной системе координат построено таким образом, что обмотки роторов обеих машин и обмотка статора первого двигателя (с неподвижным статором) неподвижны друг относительно друга и расположены на осях $\alpha1, \beta1$; единственной обмоткой, меняющей свое положение относительно других, является обмотка поворотного статора второго двигателя. Поэтому собственные индуктивности всех обмоток и взаимные индуктивности обмоток первой машины не зависят от положения статора второй машины, а взаимные индуктивности обмоток статора и ротора второго двигателя зависят. Взаимные индуктивности проходят полный цикл изменений при повороте второго статора на угол $\varphi_{эл} = 2\pi$, поэтому с учетом принятых на рисунке 2 направлений токов и знака угла поворота статора можно записать:

$$\begin{aligned} L_{s2\alpha2,r2\alpha1} &= L_{r2\alpha1,s2\alpha2} = L_\mu \cos(\pi - \varphi) = -L_\mu \cos \varphi; \\ L_{s2\alpha2,r2\beta1} &= L_{r2\beta1,s2\alpha2} = L_\mu \sin(\pi - \varphi) = L_\mu \sin \varphi; \\ L_{s2\beta2,r2\alpha1} &= L_{r2\alpha1,s2\beta2} = -L_\mu \sin(\pi - \varphi) = -L_\mu \sin \varphi; \\ L_{s2\beta2,r2\beta1} &= L_{r2\beta1,s2\beta2} = L_\mu \cos(\pi - \varphi) = -L_\mu \cos \varphi. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, подставляя в (1) – (3) выражения (4) – (11) и с учетом (12), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих динамические электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводе с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{s1\alpha1} &= R_s \cdot i_{s1\alpha1} + L_s \frac{di_{s1\alpha1}}{dt} + L_\mu \frac{di_{r\alpha1}}{dt} - (L_s \cdot i_{s1\beta1} + L_\mu \cdot i_{r\beta1}) \cdot \omega_k; \\ u_{s1\beta1} &= R_s \cdot i_{s1\beta1} + L_s \frac{di_{s1\beta1}}{dt} + L_\mu \frac{di_{r\beta1}}{dt} + (L_s \cdot i_{s1\alpha1} + L_\mu \cdot i_{r\alpha1}) \cdot \omega_k; \\ u_{s2\alpha2} &= R_s \cdot i_{s2\alpha2} + L_s \frac{di_{s2\alpha2}}{dt} - L_\mu \frac{di_{r\alpha1}}{dt} \cos \varphi + L_\mu \frac{di_{r\beta1}}{dt} \sin \varphi + \omega_s L_\mu \cdot i_{r\alpha1} \sin \varphi + \\ &\quad + \omega_s L_\mu \cdot i_{r\beta1} \cos \varphi - (L_s \cdot i_{s2\beta2} - L_\mu \cdot i_{r\alpha1} \sin \varphi - L_\mu \cdot i_{r\beta1} \cos \varphi) \cdot (\omega_k - \omega_s); \\ u_{s2\beta2} &= R_s \cdot i_{s2\beta2} + L_s \frac{di_{s2\beta2}}{dt} - L_\mu \frac{di_{r\alpha1}}{dt} \sin \varphi - L_\mu \frac{di_{r\beta1}}{dt} \cos \varphi - \omega_s L_\mu \cdot i_{r\alpha1} \cos \varphi + \\ &\quad + \omega_s L_\mu \cdot i_{r\beta1} \sin \varphi + (L_s \cdot i_{s2\alpha2} - L_\mu \cdot i_{r\alpha1} \cos \varphi + L_\mu \cdot i_{r\beta1} \sin \varphi) \cdot (\omega_k - \omega_s); \\ 0 &= R_{r\Sigma} \cdot i_{r\alpha1} + 2L_r \frac{di_{r\alpha1}}{dt} + L_\mu \frac{di_{s1\alpha1}}{dt} - L_\mu \frac{di_{s2\alpha2}}{dt} \cos \varphi - L_\mu \frac{di_{s2\beta2}}{dt} \sin \varphi + \\ &\quad + \omega_s L_\mu i_{s2\alpha2} \sin \varphi - \omega_s L_\mu i_{s2\beta2} \cos \varphi - (2L_r i_{r\beta1} + L_\mu i_{s1\beta1})(\omega_k - \omega_r) - (2L_r i_{r\beta1} + \\ &\quad + L_\mu i_{s2\alpha2} \sin \varphi - L_\mu i_{s2\beta2} \cos \varphi) \cdot (\omega_k - \omega_r); \\ 0 &= R_{r\Sigma} \cdot i_{r\alpha1} + 2L_r \frac{di_{r\beta1}}{dt} + L_\mu \frac{di_{s1\beta1}}{dt} + L_\mu \frac{di_{s2\alpha2}}{dt} \sin \varphi - L_\mu \frac{di_{s2\beta2}}{dt} \cos \varphi + \\ &\quad + \omega_s L_\mu i_{s2\alpha2} \cos \varphi + \omega_s L_\mu i_{s2\beta2} \sin \varphi + (2L_r i_{r\alpha1} + L_\mu i_{s1\alpha1})(\omega_k - \omega_r) + (2L_r i_{r\alpha1} + \\ &\quad - L_\mu i_{s2\alpha2} \cos \varphi - L_\mu i_{s2\beta2} \sin \varphi) \cdot (\omega_k - \omega_r), \end{aligned} \right. \quad (13)$$

где $\omega_s = \frac{d\varphi}{dt}$.

Полученная система уравнений может быть записана в матричном виде в форме Коши:

$$\frac{d|i|}{dt} = |F(L, \varphi)|^{-1} \cdot (|F(R, L, \varphi)| \cdot |i| - |u|),$$

где $|i| = \text{colon} |i_{s1\alpha1} \ i_{s1\beta1} \ i_{s2\alpha2} \ i_{s2\beta2} \ i_{r\alpha1} \ i_{r\beta1}|$ – матрица токов;

$|u| = \text{colon} |u_{s1\alpha1} \ u_{s1\beta1} \ u_{s2\alpha2} \ u_{s2\beta2} \ 0 \ 0|$ – матрица напряжений;

$|F(L, \varphi)|$ – матрица, коэффициенты которой зависят от индуктивных параметров и угла поворота статора;

$|F(R, L, \varphi)|$ – матрица, коэффициенты которой зависят от активных сопротивлений, индуктивных параметров, угла и частоты поворота статора.

Дифференциальное уравнение электромеханического преобразования энергии получим, воспользовавшись известными формулами [4, 5]:

$$M = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_{i=s1\alpha1}^{r2\beta1} i_i \psi_i = \frac{1}{2} \sum_{i=s1\alpha1}^{r2\beta1} i_i \frac{\partial \psi_i}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \sum_{i=s1\alpha1}^{r2\beta1} i_i \cdot \sum_{j=s1\alpha1}^{r2\beta1} \frac{\partial L_{i,j}}{\partial \varphi} i_j. \quad (14)$$

Подставив в (14) выражения (12) запишем уравнение электромагнитного момента для каждого двигателя:

$$M_1 = \frac{3}{2} p_n L_\mu (i_{r\alpha1} i_{s1\beta1} - i_{s1\alpha1} i_{r\beta1}); \quad (15)$$

$$M_2 = \frac{3}{2} p_n L_\mu ((i_{s2\alpha1} i_{r\beta1} - i_{r\alpha1} i_{s2\beta2}) \cos \varphi + (i_{s2\beta2} i_{r\beta1} + i_{s2\alpha2} i_{r\alpha1}) \sin \varphi). \quad (16)$$

Поскольку оба двигателя связаны механически, т.е. работают на общий вал, то результирующий момент равен сумме моментов каждой машины:

$$M = M_1 + M_2 = \frac{3}{2} p_n L_\mu (i_{r\alpha1} i_{s1\beta1} - i_{s1\alpha1} i_{r\beta1}) + \frac{3}{2} p_n L_\mu (i_{s2\alpha1} i_{r\beta1} - i_{r\alpha1} i_{s2\beta2}) \cos \varphi + (i_{s2\beta2} i_{r\beta1} + i_{s2\alpha2} i_{r\alpha1}) \sin \varphi. \quad (17)$$

Асинхронный двигатель с поворотным статором является электрической машиной, которая имеет две вращающиеся части – статор и ротор (рисунок 3).

Поэтому для исследования электромеханических переходных процессов полученную модель необходимо дополнить двумя уравнениями движения:

$$\frac{J_{r\Sigma}}{p_n} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{cr}; \quad (18)$$

$$\frac{J_{s\Sigma}}{p_n} \cdot \frac{d\omega_s}{dt} = M_2 - M_{cs} \quad (19)$$

где $J_{r\Sigma}$, $J_{s\Sigma}$ – моменты инерции роторов и статора и связанных с ними вращающимися массами соответственно;

M_{cr} , M_{cs} – моменты сопротивления соответственно ротору и статору.

Согласно рисунку 3, момент инерции роторов:

$$J_{r\Sigma} = J_\sigma + J_{m1} + J_{p1} + J_{m2} + J_{p2}, \quad (20)$$

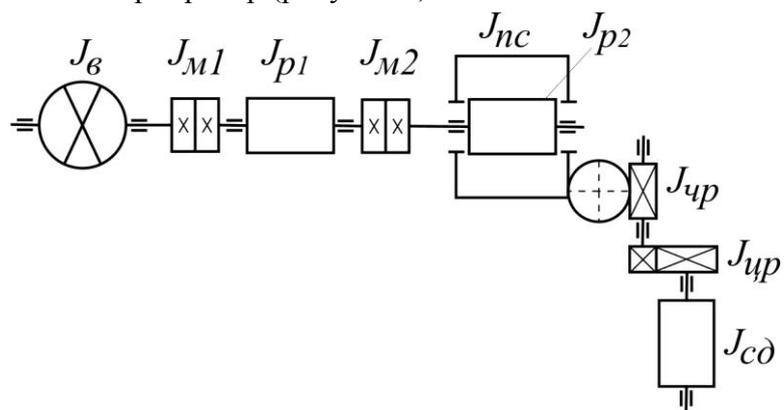


Рисунок 3 – Кинематическая схема электропривода с поворотным статором

где J_{θ} – момент инерции вентилятора;

J_{m1} – момент инерции муфты, связывающей вал вентилятора с валом ротора асинхронного двигателя;

J_{p1} – момент инерции вала ротора асинхронного двигателя с неподвижным статором;

J_{m2} – момент инерции муфты, связывающей валы роторов асинхронных двигателей;

J_{p2} – момент инерции вала ротора асинхронного двигателя с поворотным статором.

Согласно рисунку 3, момент инерции статора:

$$J_{s\Sigma} = J_{nc} + J_{чр.пр} + J_{цр.пр} + J_{сд.пр}, \quad (21)$$

где J_{nc} – момент инерции поворотного статора;

$J_{чр.пр}$ – момент инерции червячной передачи, приведенный к частоте вращения статора;

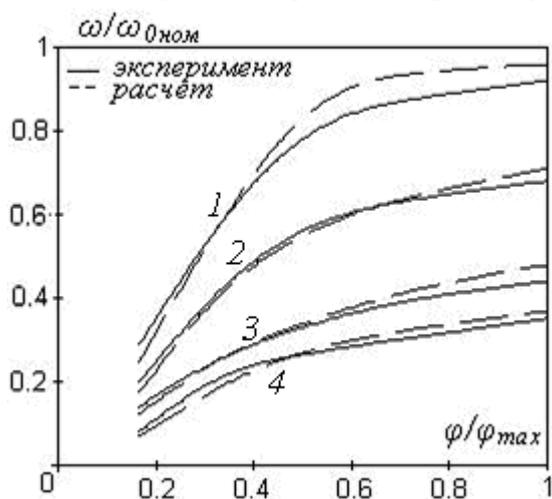
$J_{цр.пр}$ – момент инерции цилиндрической передачи, приведенный к частоте вращения статора;

$J_{сд.пр}$ – момент инерции вала ротора серводвигателя, осуществляющего поворот статора, приведенный к частоте вращения статора.

Для расчета переходных процессов в электроприводе разработанная математическая модель была реализована в компьютерной программе на языке среды MatLab [1].

Для экспериментального исследования электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор, авторами был разработан и изготовлен стенд [2, 6], содержащий два двигателя ДМТФ 012-06 с фазными роторами, один из которых выполнен с поворотным статором. Мощность каждого двигателя $P = 2,2 \text{ кВт}$, число пар полюсов $p_n = 3$. На их обмотки статоров подается трехфазная система напряжений, а цепи роторов соединены последовательно. Механизмом нагрузки электропривода является центробежный вентилятор.

На рисунке 4 показаны статические характеристики, на рисунке 5 приведен график переходного процесса по частоте вращения электропривода в режиме пуска при ступенчатом изменении угла поворота статора, полученные экспериментально и теоретически.

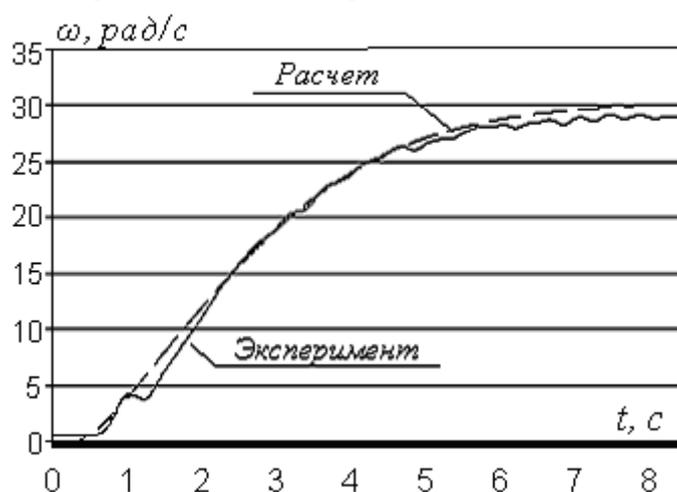


$$u_{s1}^* = 1, f_{s1}^* = 1, u_{s2}^* = 0,54, f_{s2}^* = 0,72,$$

$$u_{s3}^* = 0,352, f_{s3}^* = 0,535,$$

$$u_{s4}^* = 0,23, f_{s4}^* = 0,35$$

Рисунок 4 – Статические характеристики



$$u_s^* = 0,23, f_s^* = 0,35, \varphi = \pi / 2 \text{ эл.}$$

$$u_s^* = \frac{u_s}{u_{s,ном}}, f_s^* = \frac{f_s}{f_{s,ном}}.$$

Рисунок 5 – Осциллограмма частоты вращения в режиме пуска

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о незначительном расхождении между результатами имитационного моделирования и данными эксперимента

(при хорошем совпадении качественной картины максимальное расхождение амплитудных значений в переходных режимах не превышает 14 %, в установившихся режимах ошибка не превышает 10 %), что свидетельствует об адекватности математической модели.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель на основе дифференциальных уравнений в ортогональной системе координат, отражающая переходные электромеханические процессы в электроприводе с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор.

2. Подтверждение адекватности математической модели электропривода произведено с использованием экспериментальных данных, полученных в результате испытаний электропривода на экспериментальной установке на базе двух асинхронных электродвигателей с фазным ротором мощностью 2,2 кВт каждый. Расхождение между данными, полученными с помощью имитационного математического моделирования, и экспериментальными данными не превышает 14 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев, И.Е. MatLab 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
2. Асинхронный электропривод с поворотным статором для вспомогательных механизмов локомотивов / А.С. Космодамианский [и др.] // НТТ – наука и техника транспорта, № 4 – 2008. – С. 82 – 86.
3. Беспалов, В.Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мощинский, А.П. Петров // Электричество, № 8 – 2002 г. – С. 33 – 38.
4. Ключев, В.И. Теория электропривода: учебник для вузов / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов – М.: Высш.шк., 2001 – 326 с.
6. Стенд для исследования динамических процессов привода машин технологического назначения / А.С. Космодамианский [и др.] // Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин. Тезисы докладов III международной научной конференции. – Астрахань: изд. АГТУ, 2007. – С. 63 – 64.

Космодамианский Андрей Сергеевич

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), г. Москва
Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав» МИИТ
127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9
Тел. 8 (495) 799-95-38

Воробьев Владимир Иванович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Локомотивы» БГТУ
241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7
Тел. 89605643845

Пугачев Александр Александрович

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Э,РиЭС» БГТУ
Брянский государственный технический университет, г. Брянск
241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7
Тел. 89191928870

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕНОСНЫХ ОПОР СИСТЕМЫ ВИДЕОМОНИТОРИНГА

Анализ цифровой видеоинформации, получаемой с панорамных устройств видеонаблюдения на нежестком основании, затрудняется из-за колебаний самого панорамного устройства. Оценка уровня возмущений решается средствами механики стержневых систем с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: устройство наблюдения, переносные опоры, вибрации, стержневые системы.

Digital videoinformation analysis received from the panoramic observation devices is discommoded by the device vibrations. The estimate of disturbance level is solved by the mechanics of peg systems tools such as the finite element methods.

Key words: observation device, portable handholds, vibrations, peg systems.

Видеомониторинг объектов различного назначения является весьма эффективным способом обеспечения их безопасности, в связи с тем, что человек получает по видеоканалу до 90 % информации об окружающей среде. Целью видеомониторинга является обнаружение несанкционированного проникновения на наблюдаемую территорию посторонних объектов, первоначально не являвшихся элементами сцены.

Серьезным недостатком визуального наблюдения сцены является ограниченность объема информации, предъявляемой на экране одного монитора. Для преодоления указанного недостатка используются системы повышенной информативности, в частности системы панорамирования. Однако вследствие значительности объемов информации и ограниченности информационной пропускной способности визуального канала оператора функции распознавания в подобных системах затруднительны.

Основной проблемой мониторинга является нестабильность координат точки установки системы в процессе всего времени наблюдения и колебания системы относительно земной системы координат, что порождает явление изменения сцены в процессе наблюдения.

Это усугубляется, если панорама формируется из фрагментов.

Как показал обзор литературных данных [2], возможны различные конфигурации как системы панорамного оптико-электронного наблюдения в целом, так и оптико-механического узла, осуществляющего сканирование местности.

Для достижения обзора в 360° может быть использовано панорамное оптико-электронное устройство наблюдения (ПОЭУН), представляющее собой оптико-механический узел с компенсацией поворота изображения. Оптико-механический узел работает в старт-стопном режиме. В каждый момент времени приемной фотоэлектрической матрицей формируется один кадр, причем горизонталь земной системы координат параллельна короткой стороне кадра. После этого двигатель поворачивает оптическую систему на угол, обеспечивающий совмещение кадров по длинной стороне.

В рассматриваемом случае панорама складывается из кадров, расположенных по углу азимута через равные промежутки. Вследствие того, что аппаратная часть ПОЭУН не может отработать угол курса абсолютно точно, целесообразно формировать панораму таким образом, чтобы соседние кадры, например, $(k - 1)$ -й и k -й частично перекрывались.

Данный подход к получению общего панорамного изображения справедлив при жестком стационарном креплении системы наблюдения. В случае мобильного варианта, например организации временного наблюдения, в качестве основания может быть использована система типа треноги, столь обычная в кино- и фототехнике. В условиях внешних силовых воздействий положение оптической оси по вертикали (вдоль длинной стороны) может смещаться по некоторому закону, зависящему от колебаний стержневой системы основания.

В связи с этим возникает необходимость оценить величину этих возмущений, определить необходимую величину избыточности разрешения фотоматрицы по вертикали, реальную информационную емкость одного кадра и, в критическом для сшивки кадров в общее изображение случае, принять решение о введении стабилизирующих элементов для оптического или программного устранения «смаза изображения».

Сформулированная задача может быть решена средствами механики стержневых систем. Из методов расчета пространственных стержневых систем наиболее универсальным является метод конечных элементов (МКЭ) и его обобщение на сложные системы с повторяющимися структурами – метод суперэлементов (МСЭ) [5, 6, 8]. Такой подход, известный в строительной механике как метод подконструкций [7], имеет несомненное преимущество при одном условии – когда один стержень является одним неделимым элементом системы. Тогда подготовка данных для расчета может производиться непосредственно с конструкторского чертежа. Использование МКЭ в этом стиле при решении статических задач известно давно; его эффективность обусловлена тем, что использование традиционных функций формы конечных элементов в виде полиномов невысоких степеней приводит к точным решениям задачи статики для определенных видов нагрузок при выполнении гипотез линейной механики стержней. Вся вычислительная проблема сводится к установлению связей между стержнями (другими словами, к выполнению условий совместности деформаций) и решению системы линейных алгебраических уравнений относительно узловых перемещений или узловых сил.

В динамических задачах такой подход (полиномиальная аппроксимация перемещений) приводит к значительным ошибкам уже в определении низших частот свободных движений по очевидной причине: строгое решение уравнений динамики даже для прямого стержня постоянного сечения включает в себя гиперболические и тригонометрические функции продольной координаты, т.е. бесконечные степенные ряды, представление которых полиномами ограниченной невысокой (3...5) степени приведет к значительной погрешности даже для первой частоты. Это приводит к необходимости дробления стержней на более мелкие конечные элементы, что повышает порядок разрешающей системы алгебраических уравнений и тем самым – увеличивает влияние машинной ошибки, связанной с ограниченностью разрядной сетки. В связи с изложенным был разработан вариант метода конечных элементов (МКЭ), в котором для построения матричных характеристик стержня, рассматриваемого как один конечный элемент, используются аналитические решения задачи о свободных колебаниях [3, 4].

Рассмотрим прямой стержень конечной длины с постоянными параметрами (жесткостью и погонной массой). Будем считать, что нагрузки к нему могут быть приложены либо только по концам (узлам 0 – начало, 1 – конец стержня). В локальной системе координат, начало которой помещено в узел 0, ось s – продольная ось стержня, оси y, z – главные центральные оси поперечного сечения, вектор состояния стержня определим следующим образом:

$$\mathbf{Y}(s) = \{N \quad Q_n \quad Q_b \quad M_t \quad M_b \quad M_n \quad u \quad v \quad w \quad \theta_t \quad \theta_b \quad \theta_n\}(s)$$

где первые шесть компонент – внутренние силовые факторы, следующие три – продольное и два поперечных перемещения, последние три – углы поворота естественного трехгранника относительно оси, нормали и бинормали. Направление последних совпадает с направлениями главных центральных осей инерции поперечного сечения. Двенадцать уравнений состояния при пространственной деформации стержня имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{ds} &= \rho \cdot A \cdot \Omega^2 u; & \frac{dQ_n}{ds} &= -\rho \cdot A \cdot \Omega^2 v; & \frac{dQ_b}{ds} &= -\rho \cdot A \cdot \Omega^2 w \\ \frac{dM_t}{ds} &= -J_t \cdot \rho \Omega^2 \theta_t; & \frac{dM_n}{ds} &= Q_b; & \frac{dM_b}{ds} &= -Q_n \\ \frac{du}{ds} &= \frac{N}{E \cdot A}; & \frac{dv}{ds} &= \theta_b; & \frac{dw}{ds} &= \theta_n; \\ \frac{d\theta_t}{ds} &= \frac{M_t}{G \cdot J_t}; & \frac{d\theta_n}{ds} &= -\frac{M_n}{E \cdot J_n}; & \frac{d\theta_b}{ds} &= -\frac{M_b}{E \cdot J_b} \end{aligned} \right\}$$

составленные относительно форм свободных колебаний – обыкновенные, с постоянными коэффициентами и могут быть решены аналитически. Удобно записать решение в форме Коши, выражающей состояние в любой точке стержня через состояние в его начале (начальные параметры):

$$Y(s) = V(s, \Omega)Y_0(\Omega); \quad V(0, \Omega) = I \quad (1)$$

Здесь Ω - частота свободных колебаний, I – единичная матрица. Матрица $V(s, \Omega)$ – матрица влияния – составляется из аналитических решений уравнений состояния [0].

Очевидно, что вектор состояния можно представить разбиением на два вектора из 6 элементов: один, включающий в себя все внутренние силовые факторы и второй, включающий в себя все кинематические характеристики. Тогда матрица влияния может рассматриваться как блочно-диагональная:

$$\begin{Bmatrix} Y_F \\ Y_C \end{Bmatrix}(s, \Omega) = \begin{bmatrix} V_{FF} & V_{CF} \\ V_{FC} & V_{CC} \end{bmatrix}(s, \Omega) \begin{Bmatrix} Y_{F0} \\ Y_{C0} \end{Bmatrix}(\Omega) \quad (2)$$

Записывая (1) для конца стержня ($s=L$) и рассматривая его как систему двух уравнений с двумя неизвестными, нетрудно выразить силовые факторы в начале стержня через кинематические в конце стержня:

$$Y_{F0} = V_{FC}^{-1}(L, \Omega)[Y_{C1} - V_{CC}(L, \Omega)Y_{C0}]; \quad Y_{C1} = Y_C(L, \Omega)$$

Теперь можно записать соотношения для определения узловых силовых факторов через узловых кинематические факторы:

$$\begin{Bmatrix} Y_{F0} \\ Y_{F1} \end{Bmatrix}(\Omega) = \begin{bmatrix} -V_{FC}^{-1}(L, \Omega)V_{CC}(L, \Omega) & V_{FC}^{-1}(L, \Omega) \\ -V_{FF}(L, \Omega)V_{FC}^{-1}(L, \Omega)V_{CC}(L, \Omega) + V_{CF}(L, \Omega) & V_{FF}(L, \Omega)V_{FC}^{-1}(L, \Omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_{C0} \\ Y_{C1} \end{Bmatrix}(\Omega) \quad (3)$$

Соотношению нетрудно придать форму, характерную для статического МКЭ, вводя обозначения: $F(\Omega)$ – вектор узловых сил, $q(\Omega)$ – вектор узловых перемещений, $K(\Omega)$ – матрица "динамической" жесткости:

$$F(\Omega) = K(\Omega)q(\Omega). \quad (4)$$

Совпадение физического смысла левой части (4) и аналогичного уравнения МКЭ позволяет для описания ансамбля КЭ, моделирующего стержневую систему, использовать стандартный алгоритм МКЭ [7].

Описанный прием был использован при решении однородных и неоднородных задач о колебаниях трехмерной системы из трех стержней с абсолютно твердым телом, присоединенным к общей точке (рисунок 1). Решение однородных задач использовалось как функциональный базис для разложения внешней нагрузки в неоднородной задаче.

Результаты расчета модельной стержневой системы приведены на рисунке 2.

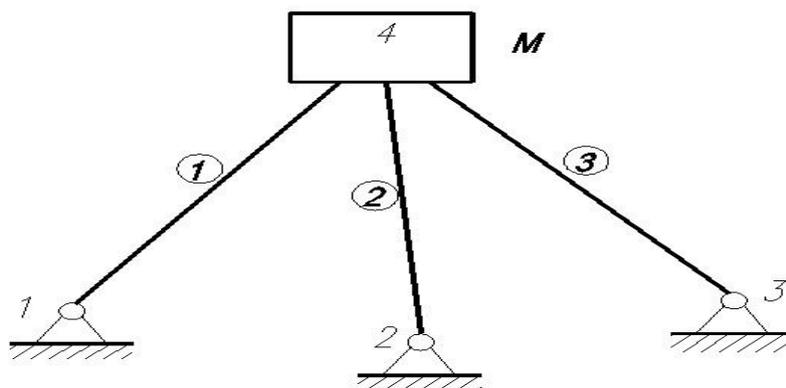


Рисунок 1 – Трехстержневая система с присоединенной массой

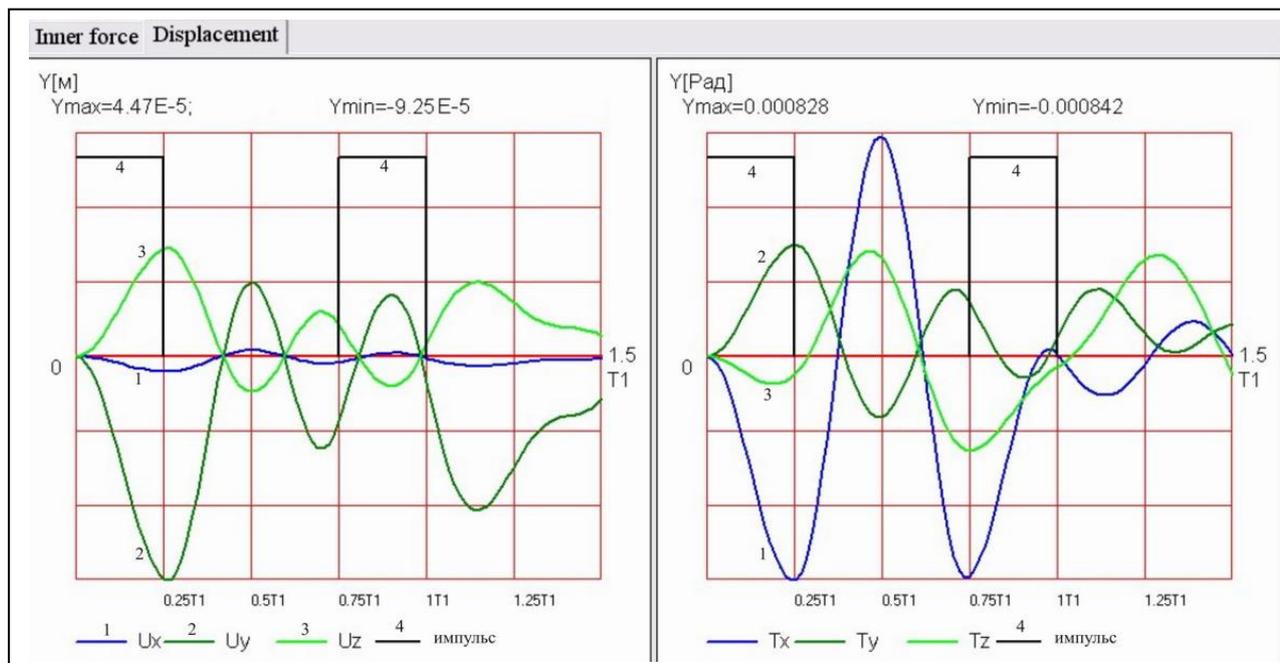


Рисунок 2 – Перемещения и углы поворота центра масс абсолютно твердого тела, присоединенного к узлу при длительности импульса 0.1 периода первой формы свободных колебаний

Таким образом, система конечных элементов позволяет определить угловые перемещения системы видеомониторинга при ее известных массо-габаритных характеристиках и определить погрешности изображения при заданных характеристиках видеоматрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин А.А., Васина М.В., Желтков В.И., Чан Тхань Хай. Анализ динамических состояний криволинейных стержней // Сборник статей Зимней Школы по механике сплошных сред Института механики сплошных сред УрО РАН. Пермь 2007. Ч.1. - с. 174... 177.
2. Грязин Г.Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства. - Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
3. Желтков В.И., Чан Тхань Хай. Определение спектра свободных движений пространственной системы прямых однородных стержней // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 1. 2008. С. 58...65.
4. Ильин И.Ю., Желтков В.И., Чан Тхань Хай. Свободные движения пространственных стержневых систем // Актуальные проблемы математики, механики, информатики. Конференция молодых ученых. Пермь, 29 февраля – 3 марта 2008 г. Сборник статей. С. 83... 87.
5. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений/ В.А. Постнов, С.А. Дмитриев, Б.К. Елтышев, А.А. Родионов. Под общей редакцией В.А. Постнова. – Л.: Судостроение, 1979. – 288 с., ил.
6. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов. Л., Изд-во Ленингр. Ун-та, 1975. 273 с.
7. Светлицкий В.А. Механика стержней: Учеб. для вузов. В 2-х ч. Ч. II. Динамика. – М.: Высш. шк., 1987. – 304 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов/ Л. Сегерлинд // - Пер. с англ.- М.: Мир, 1979. – 392 с.

Желтков Владимир Иванович

Тульский государственный университет, г. Тула
 Доктор физ.-мат.наук, профессор кафедры «Математическое моделирование»
 Тел. 89101582056
 E-mail: glob4361@mail.ru

Цудиков Михаил Борисович

Тульский государственный университет, г. Тула
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехника и робототехнические системы»
 Тел. (8487) 350219

Чан Тхань Хай

Ле Куй Дон Институт, Ханой
 Кандидат физико-математических наук, профессор
 Тел. +841697648785

Д.А. УСТИМЕНКО, А.В. КЛИМОВ

ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРОУДАРНОГО РЕЖИМА ШАРИКОПОДШИПНИКА

Рассмотрена модель подшипника качения как возможный источник возникновения виброударного режима работы. Проведен анализ наименьшего периода вибраций внутри подшипникового кольца на основании модели плоских радиальных упругих колебаний.

Ключевые слова: энергия удара, виброударный, вибрации.

The searching results of bearing model as potencial source of arising vibroimpact regime. Is conducted the analysis of the least vibration period inside inner ring of ball-bearing with planar radial model of touch vibration.

Key words: blow energy, vibroimpact, vibration.

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассказывается о возможности виброударного режима внутри шарикоподшипника в процессе его эксплуатации как одной из причин развития дефектов и выхода подшипников качения из строя. Как показано в [1] основной причиной является недостаточная толщина смазочной пленки, которая приводит к микроконтактированию внутренних поверхностей колец нагруженного подшипника с телами качения. В работе [1] толщина смазочной пленки является основным диагностическим параметром, определяющим состояние подшипника в целом. Однако объяснить причину выхода из строя некоторых подшипников ранее рассчитанной наработки только с точки зрения теории микроконтактирования не дает какие-либо удовлетворительные результаты. Подшипники, имеющие отклонения размеров партии в одних пределах, при одной и той же смазке, имеют значительно различающиеся сроки службы.

ВИБРОУДАРНЫЙ РЕЖИМ

Виброударным режимом работы любой системы называют колебательное движение, в процессе которого между её отдельными звеньями происходят соударения.

Виброударный режим часто приходится рассматривать как неприятный, но неизбежный побочный эффект. Соударения в кинематических парах приводят к увеличению динамических нагрузок на звенья, снижают долговечность и надежность механизма. Эффект ударных взаимодействий

виброударных систем оценивают коэффициентом восстановления скорости при ударе [2]. Для двух соударяющихся тел коэффициент восстановления определяется следующим соотношением (1)

$$R = \frac{U_2 - U_1}{v_1 - v_2}, \quad (1)$$

где v_1 – начальная скорость первого тела до удара;

v_2 – начальная скорость второго тела до удара;

U_1 – конечная скорость первого тела после удара;

U_2 – конечная скорость второго тела после удара.

В результате удара часть кинетической энергии переходит во внутреннюю энергию тел ΔE .

Тогда закон сохранения энергии для упруго-пластичного удара запишется в виде

$$\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot U_2^2}{2} + \Delta E, \quad (2)$$

где m_1 – масса первого тела;

m_2 – масса второго тела.

Полагая, что скорость первого тела после удара связана со скоростью первого тела до удара через коэффициент восстановления, и что скорость второго тела после удара связана со скоростью второго тела до удара через коэффициент восстановления, можно записать

$$\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} = \frac{m_1 \cdot (-R \cdot v_1)^2}{2} + \frac{m_2 \cdot (-R \cdot v_2)^2}{2} + \Delta E. \quad (3)$$

Откуда часть перешедшей из механической энергии во внутреннюю энергию тел $\Delta E'$ запишется в виде

$$\Delta E' = \left(\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} \right) \cdot (1 - R^2). \quad (4)$$

ВИБРОУДАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ШАРИКОПОДШИПНИКА

Коэффициент восстановления у деталей подшипников качения велик, потому что, поверхности закаляют до больших чисел твердости. Поверхности в результате закалки становятся очень упругими. Однако, экспериментальные данные в работах Гольдсмита [3] показывают, что коэффициент восстановления зависит также и от скорости соударяющихся тел. Так коэффициент восстановления для закаленной стали при изменении начальной скорости удара от 3 м/с до 6 м/с изменяется приблизительно в пределах от 0,8 до 0,73.

Из закона сохранения энергии, полагая, что первоначальная скорость внешнего кольца равна 0, запишем выражение для абсолютной потери кинетической энергии тела качения при одном соударении с кольцом

$$\Delta E = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} \cdot (1 - R_1^2), \quad (5)$$

где R_1 – коэффициент восстановления для тела качения при соударении с неподвижным кольцом с начальной скоростью удара v_1 .

Относительные потери кинетической энергии запишутся в виде

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E} = (1 - R_1^2). \quad (6)$$

Рассмотрим модель подшипника, представленную на рисунке 1.

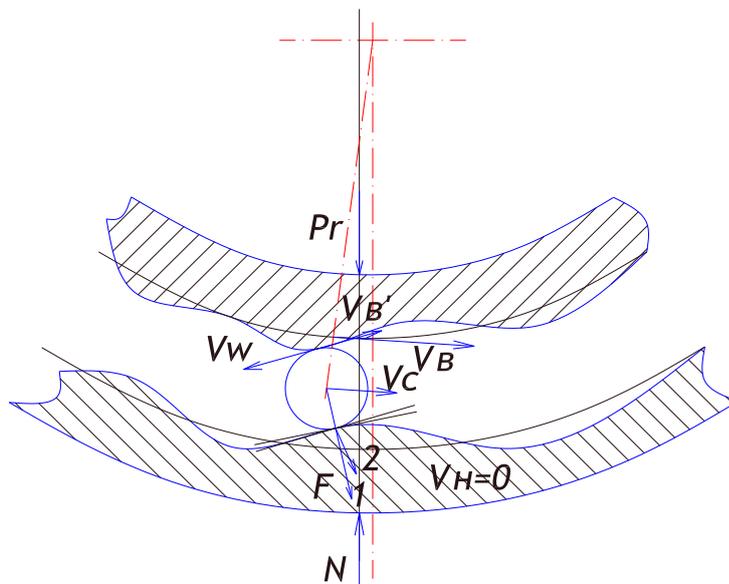


Рисунок 1 – Модель подшипника

На рисунке изображено неподвижное внешнее кольцо, вращающееся внутреннее кольцо, одно из движущихся тел качения, Волнистость дорожек колец подшипника показана в невыгодном положении, когда выступы дорожек колец совпадают друг с другом, и тело качения воспринимает нагрузку (см. рисунок 1). Удар происходит, когда выступ внутреннего кольца, подгоняя шарик, сталкивает его с волнистостью наружного кольца. В результате чего

кинетическая энергия внутреннего кольца и шарика E_1 уменьшится. Её часть перейдет во внутреннюю энергию ΔE_1 подшипника, связанную с энергией E_1 через коэффициент пропорциональности δ_{E1} . Затем тело качения столкнется с надвигающимся внутренним кольцом. В результате соударения часть ΔE_2 кинетической энергии E_2 перейдет во внутреннюю энергию подшипника, пропорциональную величине δ_{E2} . Произойдет несколько таких соударений до того момента, пока будет доставать энергии на колебания тела качения между кольцами подшипника.

Энергия колебаний тела качения расходуется на деформацию поверхностей, на нагрев, на колебания внутри материала подшипника. Колебания внутри подшипника обладают скоростью распространения в среде c , зависящей от свойств материала. В момент удара, который изображен на рисунке 1, образуется два направления распространения колебаний: перпендикулярное касательно проведенной плоскости к поверхности тела качения в месте контакта с внутренним кольцом и перпендикулярное касательно проведенной плоскости к профилю волнистости в месте контакта тела качения с внутренним кольцом. Первое из направлений ближе к радиальному направлению подшипника. Волна, отражаясь от поверхностей внешнего кольца, пройдет в пределах радиальной толщины внешнего кольца h . Второе направление распространений колебаний направлено под углом к радиальному направлению. Волна колебаний, отражаясь от внешней и внутренней поверхности внешнего кольца, распространится по нему по окружности кольца, возвратится к точке контакта тела качения и внутреннего кольца. При соударениях тела качения с внутренним и внешним кольцом процесс повторится, возникнет резонанс колебаний, который усилит вибрации подшипника. В результате этих вибраций будет стряхиваться смазка с трущихся поверхностей, произойдет разрыв смазочной пленки, возникнет микроконтактирование трущихся поверхностей, появятся дефекты дорожек и тела качения подшипника, что снизит его долговечность.

ВЫЯВЛЕНИЕ ВИБРОУДАРНОГО РЕЖИМА

Для выявления колебаний внутри материала подшипника по окружности кольца выделим период T отражений колебаний в радиальном направлении внешнего кольца, отличающийся от периода распространения колебаний по окружности внешнего кольца. Для этого величину h разделим на скорость распространения c .

Колебания происходят в той части тела качения и внешнего или внутреннего кольца, которые заключены в пределах зоны контакта. Примем, что эта часть имеет форму, приближающуюся к форме диска, тогда для расчета скорости распространения c воспользуемся решением дифференциального уравнения для радиальных колебаний диска, приведенного в [4, стр. 143]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \mu^2)}}, \quad (7)$$

где μ - коэффициент Пуассона (для стали $\mu = 0,3$)

Таблица 1 – Физические свойства подшипниковой стали ШХ15СГ[5]

Модуль упругости E , МПа	Модуль сдвига G , МПа	Плотность ρ , кг/м ³
211000	80000	7815

По формуле (7) из таблицы 1 с учетом выше сказанного $c = 5447$ м/с.

ПРИМЕР РАСЧЕТА НАИМЕНЬШЕГО ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ

В качестве примера рассчитаем период отражения колебаний для подшипника 312 ГОСТ 3883, у которого внешний диаметр $D=130$ мм, внутренний диаметр $d = 60$ мм, диаметр тел качения $D_w = 22,23$ мм, число тел качения $Z = 8$, [6]

$$h = \frac{D - d - 2 \cdot D_w}{4} = \frac{130 - 60 - 2 \cdot 22,23}{4} = 6,385 \text{ мм}$$

$$\text{Тогда } T = \frac{h}{c} = \frac{6,385 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{5447 \text{ м/с}} = 1,17 \text{ мкс}$$

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Для выявления возникновения резонансного явления в подшипниках нужно измерить периоды колебаний смазочной пленки работающего подшипника и, сравнивая с полученным расчетным значением T , выделить отличные от T периоды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.: ил.
2. Вибрации в технике. Т2: Колебания нелинейных механических систем\ Под ред.: Блехман И.И. 1979. – 352 с.
3. Гольдсмит В. Удар. Теоретические и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат, 1965. – 448 с.
4. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 320 с., ил.
5. Сайт Лаборатория машиностроителя/ Справочник. Металлы черные/ Стали подшипниковые. ШХ15СГ. – <http://www.php-gears.ru/>
6. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения. Справочник-каталог. – М.: Машиностроение, 2003, - 576 с., ил.

Устименко Дмитрий Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Соискатель

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: pms35vm@yandex.ru

Климов Алексей Викторович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

т. (4862) 41-98-13

E-mail: klimover@orel.ru

УДК 621.774.37

В.Я. ОСАДЧИЙ, В.Д. ДМИТРИЕВ, О.А. ГОНЧАР, В.Ф. КЛЕСТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ГРАТА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТРУБ ИЗ ФЕРРИТНЫХ И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Исследована работа нового устройства для раскатки внутреннего грата электросварных труб из коррозионно-стойких сталей. Определены оптимальные значения параметров работы устройства. Внедрение результатов исследования позволило повысить качество труб.

Ключевые слова: сварные трубы, аустенитные стали, ферритные стали, внутренний грат, раскатка, устройства.

New aggregate for TIG welding of corrosion-resistant tubes has been commissioned on Moscow tube plant "Filit", equipped with new type device for roll-out of inner burr. In this article the Results of investigation of process of roll-out inner burr has been represented and optimal values of base parameters of working process of this device has been determined. The application of Investigation results permit to improve tubes quality.

Key words: weld tubes, austenitic steels, ferritic steels, inner burr, roll-out, devices.

Для производства электросварных труб повышенного качества из коррозионностойких марок стали Московским трубным заводом "Филит" в Италии у фирмы Марчегалья приобретен трубоэлектросварочный агрегат 16-60. Данный агрегат позволяет изготавливать трубы из ферритных и аустенитных марок стали как круглого, так профильного сечения с раскатным наружным и внутренним и сошлифованным наружным гратом диаметром от 16 до 60 мм и толщиной стенки от 1 до 3 мм. Раскатка производится в линии стана устройством раскатки грата, установленным после опорно-сварочного узла. Кроме устройства раскатки грата отличительными особенностями ТЭСА 16-60 являются бронзовые сварочные тиски (взамен роликового узла), три последовательно установленные горелки, устройство шлифовки шва и околошовной зоны, а также шлифовальная машина для обработки всей поверхности трубы.

Устройство раскатки внутреннего и наружного грата работает на основе технологии, применяемой в станах ХПТ. Поэтому необходимо более подробно остановиться на конструкции данного устройства, т.к. оно является новым в практике отечественного производства. Устройство состоит из рабочей клетки (поз. 1, рисунок 1), совершающей возвратно-поступательное движение, гидравлической системы (поз. 3, рисунок 1) и устройств перемещения оправки (поз. 4, рисунок 1). Раскатка грата производится рабочей клетью, синхронно работающей так же с возвратно перемещаемой цилиндрической оправкой и фрикционного материала.

В рабочей клетки установлены нижний и верхний прокатные валки и два боковых валка. Весь комплект валков меняется в зависимости от диаметра свариваемой трубы. Оправка размещена внутри трубы. Давление верхнего и нижнего валка (поз. 2, рисунок 1) гарантирует раскатку наружного грата и раскатку внутреннего грата на оправке. Пара боковых валков предохраняет от возможной деформации прокатываемой трубы. Устройство перемещения оправки состоит из станины, гидропривода перемещения оправки (поз. 5, рисунок 1) и моторедуктора (поз. 6, рисунок 1) для вращения оправки во избежание локального износа. На нижней части устройства возвращения оправки смонтирован шкив (поз. 7, рисунок 1) для намотки троса.

Раскатка грата производится при непрерывном движении трубы при рабочем ход и в направлении противоположном движению сваренной трубы. Скорость трубы до 7 м/мин.

Скорость устройства раскатки грата до 35 удар/мин. В зависимости от требований эксплуатации величину хода клетки и ее скорость можно менять. Раскатка дает существенные преимущества по сравнению с традиционными способами снятия внутреннего и наружного грата. Прежде всего – это более качественная внутренняя трубы. Также при раскатке отсутствует стружка, что неизбежно при снятии внутреннего и наружного грата резцом. Кроме того, представленный способ позволяет решить проблему удаления внутреннего грата на трубах малого диаметра.

В настоящее время ведутся работы по разработке оптимальных режимов раскатки внутреннего грата с целью не только повышения качества внутренней поверхности трубы, но и уменьшения межкристаллитной коррозии.

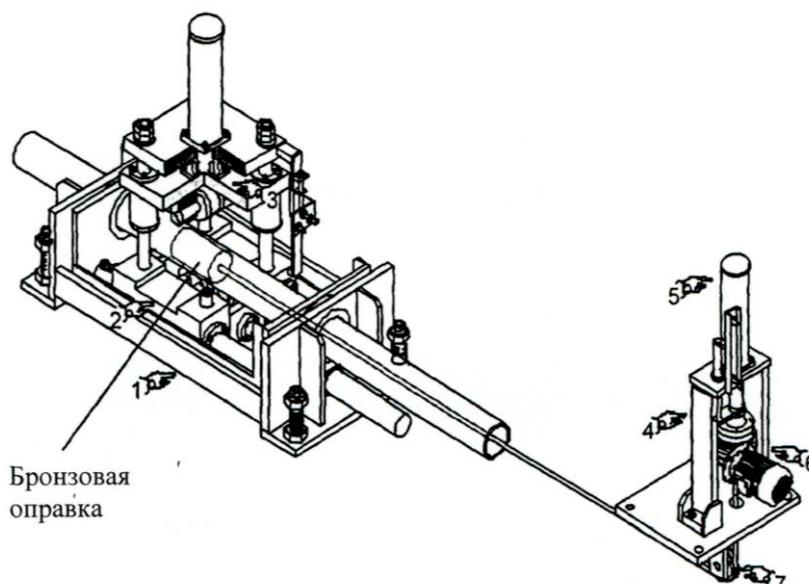


Рисунок 1 – Устройство раскатки внутреннего и наружного грата
1 – рабочая клетка; 2 – место для нижнего валка; 3 – гидравлическая система;
4 – устройство перемещения оправки; 5 – гидропривод перемещения оправки;
6 – моторредуктор; 7 – шкив для намотки троса

Большой интерес представляет определение геометрии очага деформации труб (рисунок 2) в устройстве раскатки грата и определение площади ее контакта в зависимости от диаметра трубы и калибров верхнего и нижнего валков.

В деформированном состоянии труба принимает форму овала на оправке за счет того, что радиусы калибров валков немного больше радиуса трубы. При этом возникают неизвестные величины: углы контакта трубы с верхним и нижним валками α и β (рисунок 2) боковой радиус трубы R_6 (рисунок 2, 4).

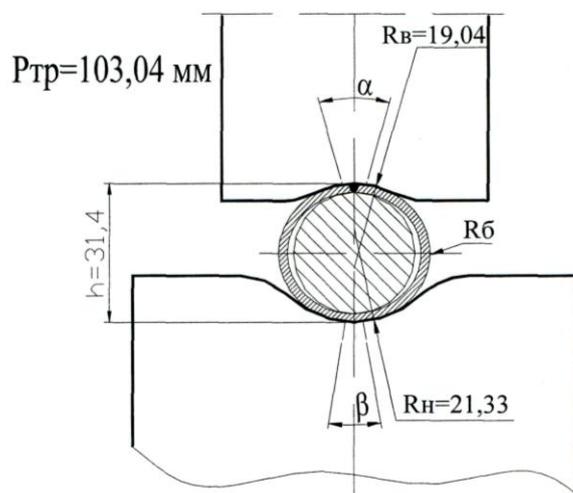


Рисунок 2 – Очаг деформации на примере трубы $\varnothing 32 \times 2,5$ мм

Известными величинами являются:

- радиус калибра верхнего валка R_B , мм (рисунок 2);
- радиус калибра нижнего валка R_H , мм (рисунок 2);
- периметр трубной заготовки после выхода из опорно-сварочного узла P , мм;

Используя некоторые геометрические преобразования, мы получаем систему уравнений (1), с помощью которой можно получить углы контакта трубы с верхним и нижним валками, необходимые для определения площади контакта трубы с валками и для последующего расчета давлений металла на валок.

$$\begin{cases} h = R_{\sigma} \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\beta}{2} \right) + R_{\sigma} \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) + R_H \cdot \left(1 - \cos \frac{\beta}{2} \right) \\ P = R_{\sigma} \cdot \alpha + R_H \cdot \beta + R_{\sigma} \cdot (2\pi - \alpha - \beta) \\ \cos \frac{\alpha}{2} \cdot (R_{\sigma} - R_{\sigma}) \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \right) = R_{\sigma} + R_H - h \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 3 представлена схема продольной деформации трубы в системе валок – оправка.

Используем известные величины очага деформации:

H – высота трубы от ее оси до начала раскатки ($2H$ равна высоте трубы из опорно-сварочного узла, мм);

h – высота трубы во время раскатки, $h = d_{on} + S$, мм;

H' – высота трубы от оси до поверхности после раскатки, мм (получена на основе практических замеров);

d_{on} – диаметр оправки, мм;

S – толщина стенки, мм;

R – радиус калибра валка, мм.

Определим неизвестные величины:

γ_1 – угол захвата трубы до процесса раскатки, град, (формула 2) [1, стр.35];

γ_2 – угол выхода трубы после процесса раскатки, град, (формула 3) [1, стр.35].

$$\gamma_1 = \arccos \left(1 - \frac{H - h}{R} \right). \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \arccos \left(1 - \frac{H' - h}{R} \right). \quad (3)$$

Определяем соответствующие им проекции B и B' (рисунок 3).

$$B = R \times \sin \gamma_1 \quad (4)$$

$$B' = R \times \sin \gamma_2 \quad (5)$$

Для определения площади контакта трубы с валком определяем проекцию поверхности на горизонтальную плоскость (рисунок 4):

$$L = 2R \times \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

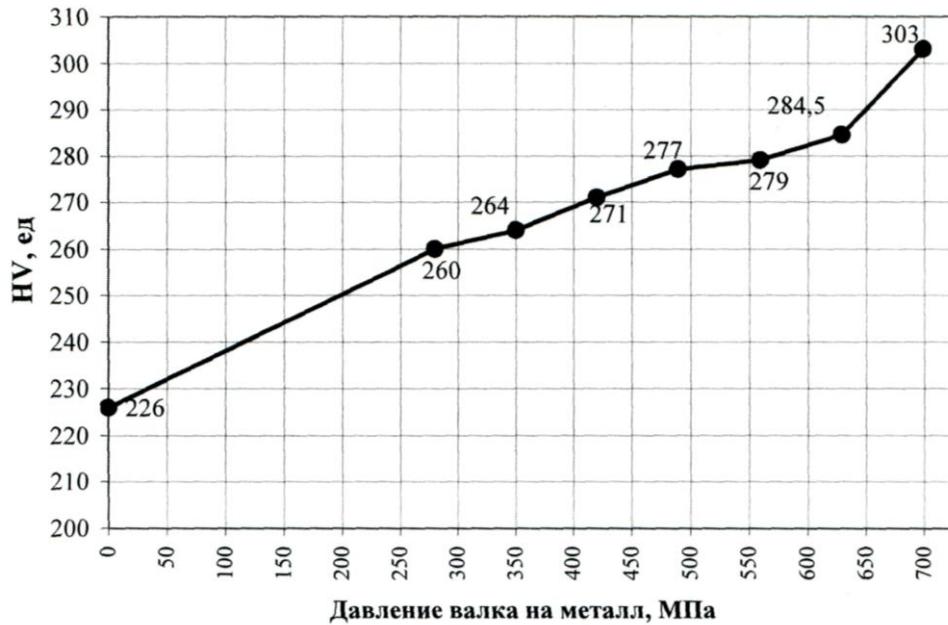
где L – проекция поверхности на горизонтальную плоскость, мм

R – радиус калибра валка, мм;

α – угол контакта трубы с верхним валком, град.

«Виккерс») представлены в графическом виде (рисунок 5). Диаграмма называет, что с увеличением давления повышаются твердость сварного шва, и упрочнение металла в области сварного соединения. При холодной обработке давлением упрочнение, т.е. рост сопротивления металла с увеличением деформации, приводит к повышению прочностных свойств металла (его предела текучести, предела прочности). Таким образом, видно, насколько важны правильный выбор давления раскатки и калибровка инструмента. Необходимо при работе использовать такие параметры, при которых бы и грат раскатывается без остатка, и упрочнение металла сводилось к приемлемым значениям. В этом может помочь приведенная выше методика.

Изменение твердости металла сварного шва при увеличении давления



Давление в гидроц., бар	40	50	60	70	80	90	100
Соотв. давл. на мет., МПа	279,7	349,6	419,5	489,5	559,4	629,3	699,2
Соотв. тверд. св. шва, HV ед	260	264	271	277	279	284,5	303

Рисунок 5 – Диаграмма твердости металла

Установлено также, что еще одним фактором повышения качества раскатанной поверхности является кратность раскаток. Исследования проводились расчетным путем. Первоначальной необходимостью исследований является анализ и расчет зависимости скорости движения трубы от скоростных параметров раскатки.

Параметры процесса, от которых зависит кратность раскатки следующие:

V_{TR} – скорость трубы, м/мин;

$n_{у.р.г.}$ – скорость устройства раскатки, удар/мин;

$L_{г.х.}$ – длина горизонтального пути устройства раскатки грата, мм.

Исходя из проведенного анализа и промежуточных расчетов, были выявлены следующие основные зависимости величины горизонтального пути устройства от скорости движения трубы и скорости устройства раскатки:

Для однократной раскатки:
$$L = 500 \times \frac{V_{TR}}{n} \quad (12)$$

Для двукратной раскатки:
$$L = 1500 \times \frac{V_{TR}}{n} \quad (13)$$

Для трехкратной раскатки:
$$L = 2500 \times \frac{V_{TR}}{n} \quad (14)$$

Таким образом, принимаем формулу горизонтального пути раскатки грата (15)

$$L = \lambda \times \frac{V_{TP}}{n} \Rightarrow n = \lambda \times \frac{V_{TP}}{L} \quad (15)$$

где λ – коэффициент, полученный при переводе единиц измерений в единую систему измерений, т.е.

для однократной раскатки

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 500 \\ \text{для двукратной раскатки} \quad \lambda = 1500 \Rightarrow \\ \lambda = 2500 \end{array} \right\} \lambda = 500 + (K - 1) \times 1000$$

для трехкратной раскатки

где K – кратность раскаток.

В результате получена основная формула (16) для определения количества ударов $n_{y.p.e.}$ устройства раскатки грата, в зависимости от кратности раскаток K :

$$n_{y.p.e.} = (500 + (K - 1) \times 1000) \times \frac{V_{TP}}{L} \quad (16)$$

На рисунке 6 представлен процесс раскатки грата при движении трубы и рабочей клетки устройства. Эта схема представлена для неравномерной двукратной раскатки, в этом случае $S_x < 1/2 S_p \Rightarrow$ исходя из расчетов отрезок $S_p - 2S_x$ закатывается 1 раз, остальное расстояние, равное S_x закатывается 2 раза, т.е. происходит сочетание однократной с двукратной раскаткой грата. Это происходит за счет несогласования скорости движения трубы и устройства раскатки грата.

Как показывает практика неравномерная раскатка (рисунок 6) оказывает неблагоприятное влияние на качество поверхности трубы. Это ведет, к неравномерному распределению механических свойств в области сварного шва по длине трубы, так и толщины стенки периметру трубы.

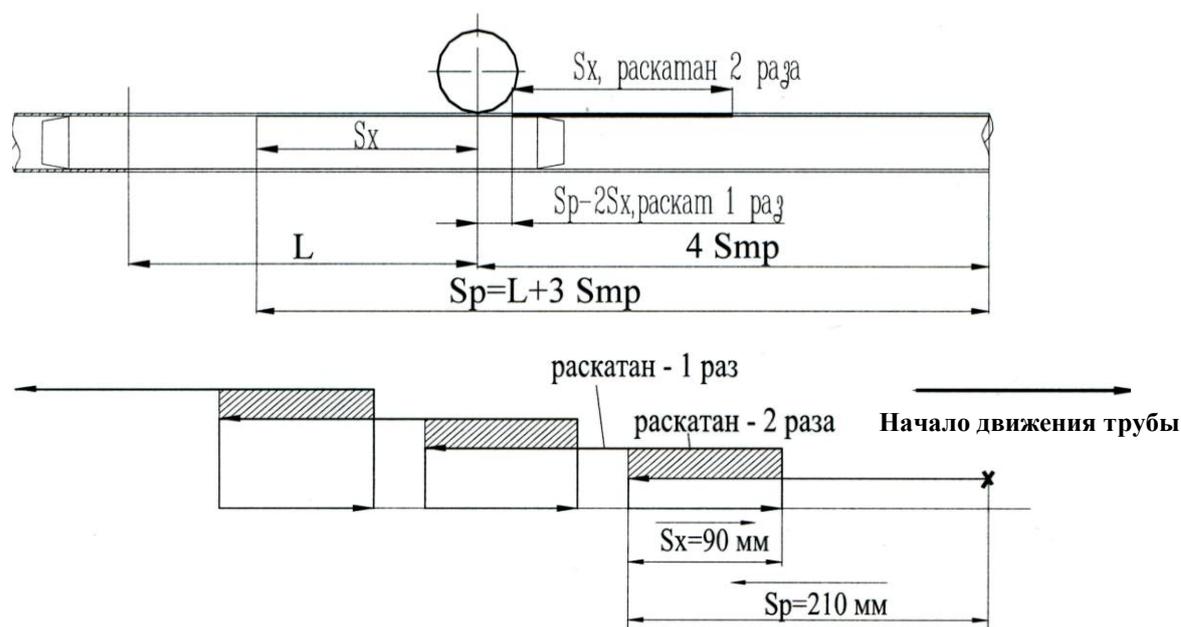


Рисунок 6 – Схема раскатки грата трубы во время хода рабочей клетки при неравномерной двукратной раскатке

Пользуясь вышеперечисленными расчетами и исследованиями на практике выяснено, что благоприятная схема раскатки – равномерная двукратная, когда $S_x = 1/2 S_p$ (схема представлена на рисунке 7). При этом сохраняются механические свойства по всей длине трубы, а толщина стенки в области раскатки выравнивается.

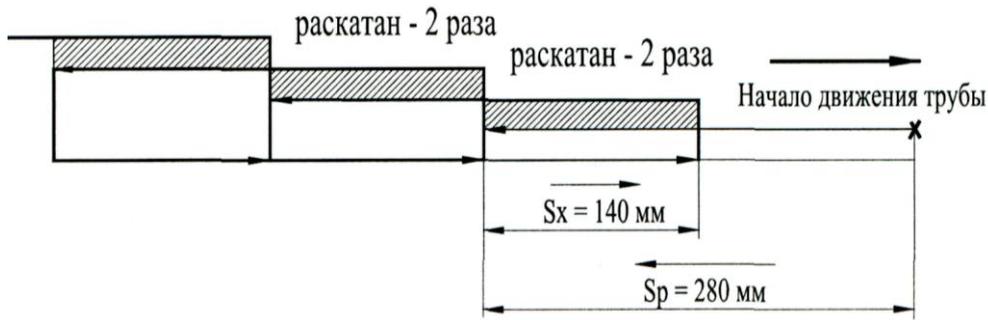


Рисунок 7 – Схема равномерной двукратной раскатки грата трубы

Заключение

В проведенных исследованиях рассчитаны площади контакта металла с валками и зависимости этих площадей от калибра и диаметров валков. Также проведены расчеты давления валков на металл в процессе раскатки, в зависимости от фактического давления в гидроцилиндре.

С целью повышения качества поверхности труб предложены новые скоростные параметры устройства раскатки грата в зависимости от скорости трубы.

Кратность раскатки влияет на чистоту поверхности металла и на распределение механических свойств по длине трубы, а также на изменение толщины стенки в области раскатки металла.

Из представленного материала видно, насколько важно понимать сущность процесса раскатки грата и использовать оптимальные расчетные параметры при его использовании. В случае рассогласования скорости сварки, скорости раскатки, давления раскатки, материала трубы и калибровки верхнего и нижнего валков узла раскатки, можно не только добиться положительного эффекта, но и, наоборот, снизить качество сваренной заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чекмарев А.П., Ваткин Я.Л. Основы прокатки труб в круглых калибрах. М.: «Металлургиздат», 1962 г. 224 с.
2. Ю.И.Абальян, В.Ф. Клестов, О.А. Еремина, А.Б. Ламин, В.Я.Осадчий, В.Д.Дмитриев. Особенности нового трубозлектросварочного агрегата ТСА 16-60 Московского Трубного завода «Филит». Бюллетень ЧМ, №5, 2005, с. 41-45.

Осадчий Владимир Яковлевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики
Д-р.техн.наук, профессор, зав.кафедрой ТИ-2 МГУПИ
Адрес: 125009, Москва, ул. Тверская, д.8, к.2, кв.25
Тел. 4956296590

Дмитриев Виктор Дмитриевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики
Канд.техн.наук доцент, МГУПИ
Адрес: 117525, Москва, ул. Чертановская, д.34, к.1, кв.28.
Тел.: 8-903-6142122 ,
E-mail: VDV36@mail.ru

Гончар Олеся Александровна

ОАО Московский трубный завод "Филит"
Канд.техн.наук, инженер-технолог
Адрес: 121096 Москва, ул.Василисы Кожинной, д.22, кв.13
Тел.8-903-1022673,
E-mail: Les-sky@mail.ru

Клестов Виктор Федорович

ОАО Московский трубный завод "Филит",
Канд.техн.наук, директор по качеству и технологии
Адрес: Москва, ул. Ново-Басманная, д.17-а, кв.58
Тел.8-916-2027102
E-mail: Les-sky@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫХОДЕ ЗУБА ИЗ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В статье представлены теоретические исследования ударной нагрузки на режущей кромке, возникающей в момент выхода зуба из зоны обработки.

Ключевые слова: фрезерование, динамика процесса, режущий клин.

In this article are represented theoretical research of shock loading on a cutting edge in a moment tooth outlet zone of milling.

Key words: milling, dynamics of the process, a cutting wedge.

При фрезеровании плоских и других поверхностей на выходе зуба из зоны обработки опора для образующейся стружки резко снижается, и стружка начинает отгибаться. При смене её положения относительно передней поверхности резца и поверхности резания, напряжения, действующие у вершины зуба меняются от сжимающих до изгибающих и растягивающих, это приводит к образованию трещин и ускоренному износу твердосплавной пластины у вершины зуба.

Теоретические исследования, объясняющие этот эффект (разгрузочный удар) в настоящее время отсутствуют, что не даёт руководящей основы для всестороннего изучения этого явления и установления причин его возникновения с целью создания условий резания препятствующих созданию растягивающих напряжений.

С целью исследования процесса резания на выходе зуба из зоны обработки в качестве исходной была взята схема силового взаимодействия режущего клина с обрабатываемым материалом [1].

Используя схему резания с условной плоскостью сдвига, рассмотрим схему силового взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом, представив её в сечении плоскостью, перпендикулярной к режущей кромке (рисунок 1).

С момента начала контакта инструмента с заготовкой на передней поверхности инструмента возникает сила резания (стружкообразования) R (на рисунке 1 показана сплошной линией), которую можно представить как геометрическую сумму сил нормального давления N и трения F : $\overline{R} = \overline{N} + \overline{F}$.

В этом случае угол η между силами N и F – угол трения, а $\operatorname{tg} \eta = F/N = \mu$ – коэффициент трения.

Действие силы R на стружку вызывает появление напряжений в условной плоскости сдвига OA , для определения величин которых сила резания R переносится в точку пересечения с условной плоскостью сдвига и раскладывается на составляющие P_τ , действующую вдоль этой плоскости, и P_N , перпендикулярную к ней (рисунок 1). Тогда составляющая

$$P_\tau = \tau \cdot f_c = \tau \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \Phi},$$

где τ – касательное напряжение на условной плоскости сдвига;

$$f_c \text{ – площадь сдвига, } f_c = \frac{a \cdot b}{\sin \Phi};$$

a, b – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя.

Составляющая

$$P_N = \sigma_N \cdot f_c = \sigma_N \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \Phi},$$

где σ_N – нормальное напряжение сжатия на условной плоскости сдвига.

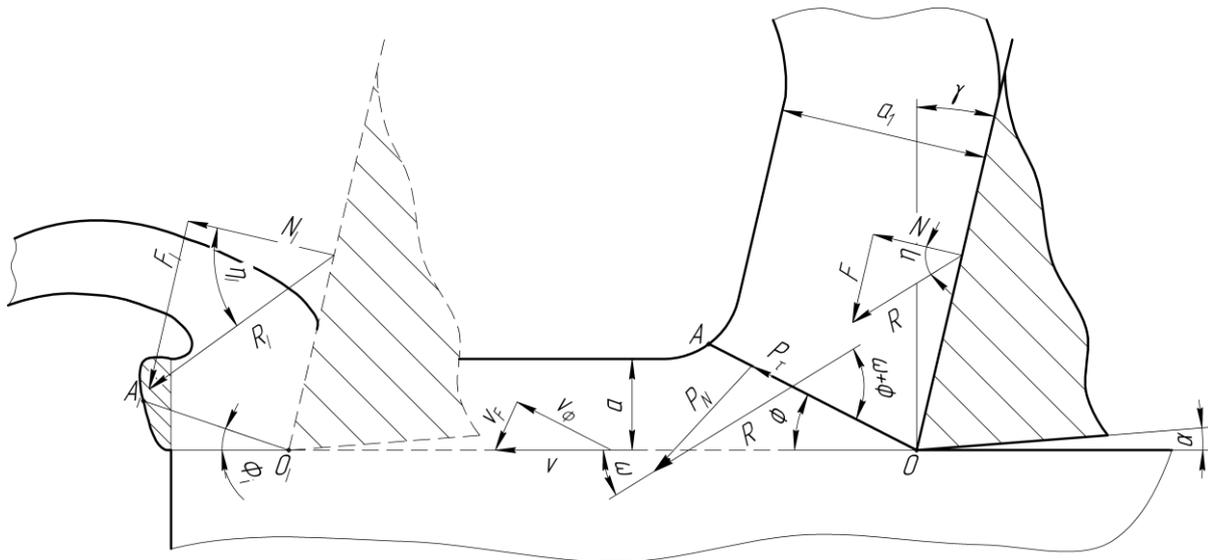


Рисунок 1 – Схема силового взаимодействия режущего клина с обрабатываемым материалом

Многочисленные эксперименты показывают, что независимо от условий резания (обрабатываемого материала, скорости резания, толщины и ширины срезаемого слоя, переднего угла инструмента) распределение касательного напряжения τ по длине условной плоскости сдвига примерно равномерное .

Распределение нормальных напряжений σ_N имеет более сложный характер и зависит от степени деформации и режима резания. Так, например, при малой степени деформации (резание на микроскоростях с большим передним углом) нормальные напряжения вдоль условной плоскости сдвига σ_N могут принимать положительные и отрицательные значения. При больших степенях деформации и применяемых на практике скоростях резания нормальное напряжение σ_N имеет положительное значение и распределяется примерно так же равномерно, как и касательное напряжение.

Для исследования процесса резания на выходе зуба из зоны обработки было принято следующее допущение: пластическая деформация на торце заготовки не учитывается (рисунок 2), а также сделано предположение, что из-за пластической деформации на торце заготовки в зоне АВ изменяется усадка стружки К таким образом, что угол наклона условной плоскости сдвига уменьшается от значения Φ_0 до некоторого значения близкого к нулю.

Предположив, что условная плоскость сдвига при приближении режущего клина к «выходу» из зоны резания начинает поворачиваться против часовой стрелки (на рисунке 1 показана пунктирной линией).

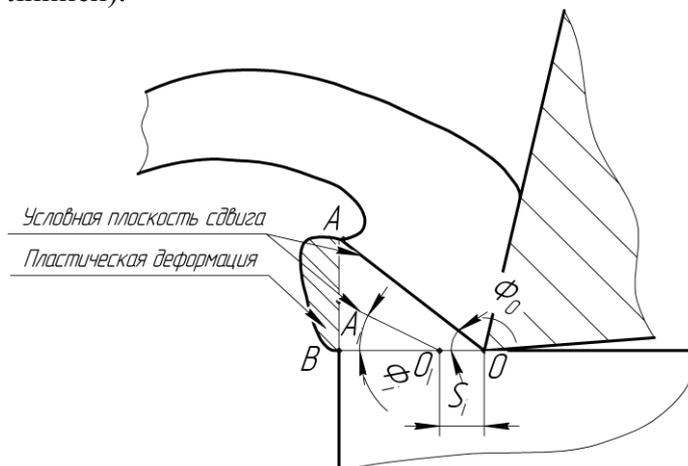


Рисунок 2 – Схема поворота условной плоскости сдвига при выходе режущего клина из зоны резания

При перемещении режущего клина на некоторое расстояние S_i , угол наклона условной плоскости принимает некоторое значение Φ_i . Из-за изменения (уменьшения) длины условной плоскости сдвига, уменьшаются силы $P_{\tau i}$ и $P_{N i}$.

$$\frac{OB}{OA} = \cos \Phi_0$$

$$\frac{OB - S_i}{OA_i} = \cos \Phi_i$$

откуда

$$OA_i = \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i}$$

$$P_{\tau i} = \tau \cdot OA_i = \tau \cdot \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i}$$

$$P_{N i} = \sigma_N \cdot OA_i = \sigma_N \cdot \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i}$$

$$\operatorname{tg}(\omega_0 + \Phi_0) = \frac{P_N}{P_\tau} = \frac{\sigma_N}{\tau} = \frac{P_{N i}}{P_{\tau i}} = \operatorname{const},$$

следовательно, ω тоже меняет свое значение:

$$\omega_0 + \Phi_0 = \omega_i + \Phi_i; \quad \omega_i = \omega_0 + \Phi_0 - \Phi_i = \omega_0 + \square \Phi$$

сила резания тоже уменьшается:

$$R = \sqrt{P_\tau^2 + P_N^2} = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot OA \cdot \cos \Phi_0$$

$$R_i = \sqrt{P_{\tau i}^2 + P_{N i}^2} = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i}$$

$$R_i < R$$

сила трения, действующая на переднюю поверхность со стороны стружки равна:

$$\eta_i = \omega_0 + \gamma + \Phi_0 - \Phi_i$$

$$F_i = R_i \cdot \sin \eta_i = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i} \cdot \sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0 - \Phi_i)$$

$$F_i = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot (OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i) \cdot [\sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) - \cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \operatorname{tg} \Phi_i]$$

Величина силы трения также уменьшается, по мере приближения режущего клина к «выходу» из зоны резания.

Сила нормальной реакции, действующая со стороны передней поверхности на стружку равна:

$$N_i = R_i \cdot \cos \eta_i = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot \frac{OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i}{\cos \Phi_i} \cdot \cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0 - \Phi_i)$$

$$N_i = \sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot (OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i) \cdot [\cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) + \sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \operatorname{tg} \Phi_i]$$

Величина силы нормальной реакции тоже уменьшается, по мере приближения режущего клина к «выходу» из зоны резания.

Эксперименты Н.Г. Абуладзе показали, что длину участка пластического контакта (рисунок 3) при резании металлов можно определить по следующей эмпирической зависимости:

$$C_1 = a \cdot [K \cdot (1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma],$$

где a – толщина срезаемого слоя;
 K – усадка стружки.

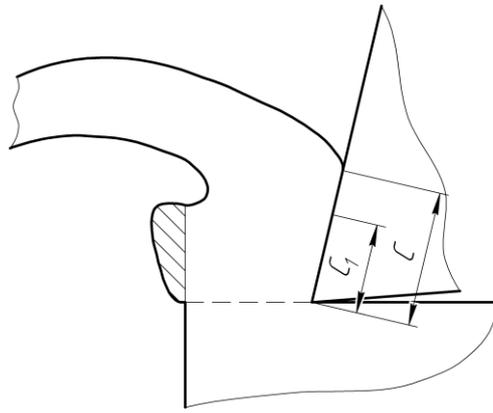


Рисунок 3 – Схема расположения зон контакта стружки с передней поверхностью режущего клина

Так как при выходе режущего клина из зоны резания, угол Φ меняется, то и толщина фактически срезаемого слоя изменяет своё значение (рисунок 4).

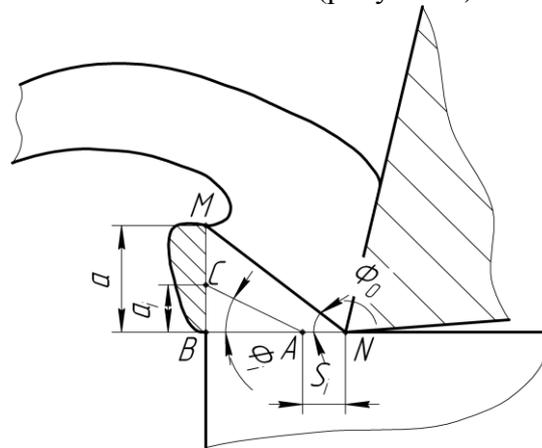


Рисунок 4 – Схема изменения величины фактически срезаемого слоя

$$\frac{CB}{BA} = \operatorname{tg} \Phi_i; \quad CB = a_i$$

$$\frac{MB}{BN} = \operatorname{tg} \Phi_0; \quad MB = a$$

$$BN = BA + S_i$$

$$a_i = (BN - S_i) \cdot \operatorname{tg} \Phi_i; \quad BN = \frac{a}{\operatorname{tg} \Phi_0}$$

$$a_i = \left(\frac{a}{\operatorname{tg} \Phi_0} - S_i \right) \cdot \operatorname{tg} \Phi_i;$$

тогда длина участка пластического контакта равна:

$$C_{li} = \left(\frac{a}{\operatorname{tg} \Phi_0} - S_i \right) \cdot \operatorname{tg} \Phi_i \cdot \left[K_i \cdot (1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma \right]$$

$$K_i = \frac{\cos(\Phi_i - \gamma)}{\sin \Phi_i} = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \Phi_i} + \sin \gamma$$

$$C_{li} = \left(\frac{a}{\operatorname{tg} \Phi_0} - S_i \right) \cdot \left[\frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \Phi_i} \cdot (1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sin \gamma \cdot (1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma \right] \cdot \operatorname{tg} \Phi_i$$

Длина участка пластического контакта также уменьшается. Она уменьшается не пропорционально уменьшению силы трения и силы нормальной реакции действующих на

передней поверхности. Из-за чего напряжения τ_F и σ_N сосредотачиваются на меньшей площади на вершине режущего клина и имеют более высокие значения, чем при непрерывном резании.

Для анализа изменения напряжений τ_F и σ_N на вершине режущего зададимся исходными данными: $\gamma = 10^\circ$; $K = 2$; $\Phi_0 = 30^\circ$; $\omega = 20^\circ$.

$$\tau_F \square \frac{F}{C_1} = \frac{\sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot (OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i) \cdot [\sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) - \cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \text{tg} \Phi_i]}{\left(\frac{a}{\text{tg} \Phi_0} - S_i\right) \cdot \left[\frac{\cos \gamma}{\text{tg} \Phi_i} \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sin \gamma \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sec \gamma\right] \cdot \text{tg} \Phi_i}$$

Преобразовав, получим:

$$\frac{F}{C_1} \square \frac{[\sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) - \cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \text{tg} \Phi_i]}{\left[\frac{\cos \gamma}{\text{tg} \Phi_i} \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sin \gamma \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sec \gamma\right] \cdot \text{tg} \Phi_i}$$

Подставив численные данные с учётом изменения угла Φ_i от 30 до 1 градуса получим:

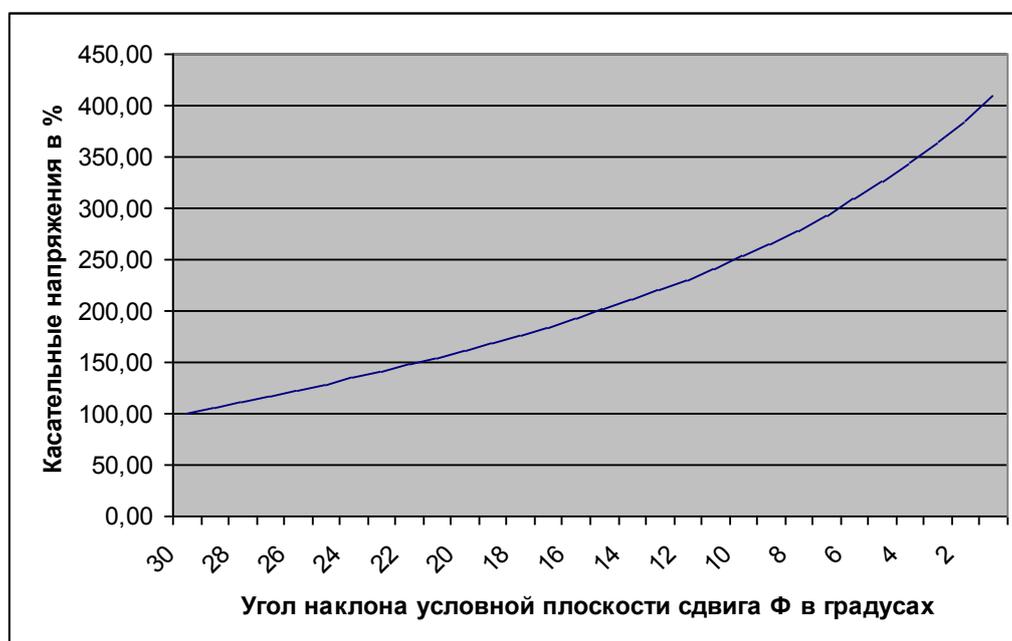


Рисунок 5 – График изменения величины касательных напряжений в % от исходного напряжения от угла наклона Φ_i условной плоскости сдвига

Из графика видно, что касательные напряжения возрастают в 4,1 раза.

Аналогично производится сравнение изменения нормальных напряжений

$$\sigma_N \square \frac{N}{C_1} = \frac{\sqrt{\tau^2 + \sigma_N^2} \cdot (OA \cdot \cos \Phi_0 - S_i) \cdot [\cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) + \sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \text{tg} \Phi_i]}{\left(\frac{a}{\text{tg} \Phi_0} - S_i\right) \cdot \left[\frac{\cos \gamma}{\text{tg} \Phi_i} \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sin \gamma \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sec \gamma\right] \cdot \text{tg} \Phi_i}$$

Преобразовав, получим:

$$\frac{N}{C_1} \square \frac{[\cos(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) + \sin(\omega_0 + \gamma + \Phi_0) \cdot \text{tg} \Phi_i]}{\left[\frac{\cos \gamma}{\text{tg} \Phi_i} \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sin \gamma \cdot (1 + \text{tg} \gamma) + \sec \gamma\right] \cdot \text{tg} \Phi_i}$$

Подставив численные данные с учётом изменения угла Φ_i от 30 до 1 градуса получим:

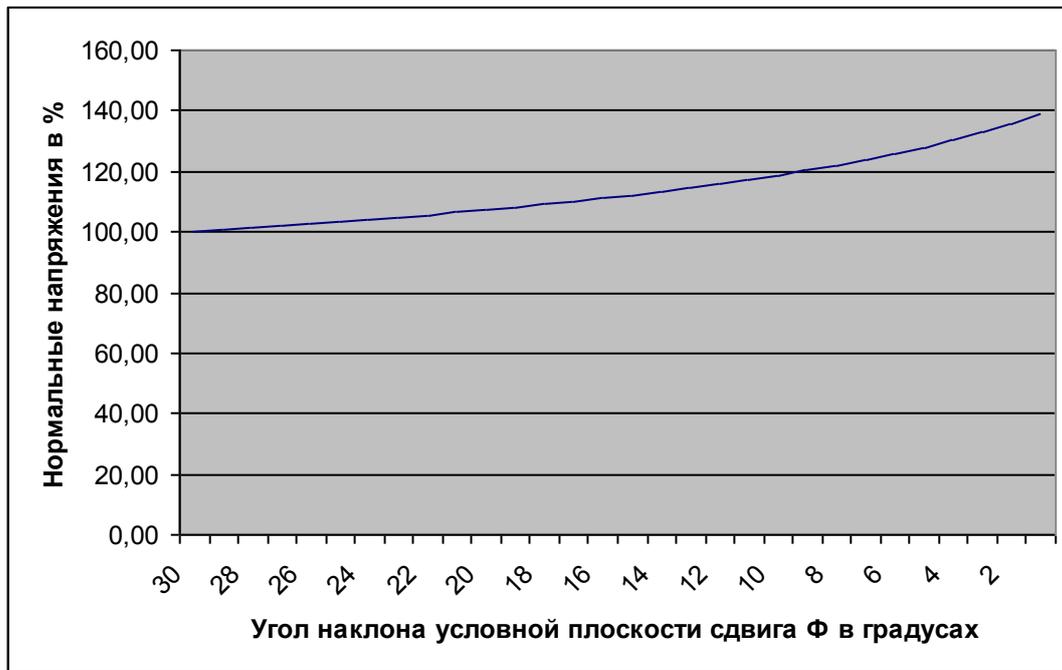


Рисунок 6 – График изменения величины нормальных напряжений в % от исходного напряжения от угла наклона Φ ; условной плоскости сдвига

Из графика видно, что касательные напряжения возрастают в 1,4 раза.

Резкое возрастание касательных напряжений на вершине твердосплавной пластины способствует повышенному образованию трещин на вершине твердосплавной пластины, а резкое возрастание нормальных напряжений способствует их повышенному развитию при выходе твёрдосплавной пластины из зоны обработки.

ВЫВОДЫ

На основании предположения о уменьшении угла наклона условной плоскости сдвига при выходе зуба из зоны обработки за счёт возникновения пластической деформации на торце заготовки от Φ до некоторого значения близкого к нулю получены зависимости изменения касательных и нормальных напряжений у вершины режущей кромки зуба.

Выведены зависимости для расчёта касательных и нормальных напряжений. Показано на примере, что при уменьшении условной плоскости сдвига нормальные и касательные напряжения возрастают в 1,4 и 4,1 раза соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников Д.В. Резание материалов: Учебник для студентов высших учебных заведений / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов / Под общей редакцией С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2007. 304 с.; ил.
2. Александров А.В. Сопротивление материалов: Учебник для вузов/ А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; Под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.; ил.

Амбросимов Сергей Константинович

Липецкий государственный технический университет
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (4742) 74-39-36

Большаков Алексей Николаевич

Липецкий государственный технический университет
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Тел. 8-951-305-36-62

ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ТРУБЫ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ СЕЧЕНИЕМ

Рассматривается изгиб моментом тонкостенной трубы с двумя видами ограничений – исключая и допускающим изменение проходного сечения. Искомыми величинами являются изменения толщины стенки и высоты сечения.

Ключевые слова: изгиб моментом, вариационный метод, смещение нейтральной поверхности, оваллизация сечения, утонение стенки.

The bend with a moment of thin-walled pipe with two kinds of limitations – exclusive and admmissive of clearing section changes are considered. The sought quantities are changes of wall thickness and those of section height.

Key words: bending with moment, variational method, displacement of neutral surface, section elongation, wall thinning.

В результате изгиба исходное значение t_0 толщины стенки трубы изменяется в диапазоне от t_{\min} до t_{\max} , рисунок 1.

Поверхность нулевых деформаций ε_φ , называемая нейтральной, проходит в данном случае по изогнутой оси трубы. Радиус кривизны произвольного материального волокна изогнутой трубы, привязанного к центру сечения координатами ρ и α , составляет $R = R_0 + \rho \sin \alpha$. Его исходная длина $l_0 = R_0 \varphi_0$, относительное удлинение (укорочение)

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R_0} \quad (1)$$

При больших радиусах оси трубы напряженное состояние считается линейным, а значит, поперечные деформации в направлениях ρ и α равны между собой. Исходя из равенства нулю суммы относительных удлинений по трем координатам, имеем соотношения деформаций

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\rho = -0,5\varepsilon_\varphi \quad (2)$$

Деформации связаны с перемещениями формулами

$$\varepsilon_\rho = \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}, \quad \varepsilon_\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{u_\rho}{\rho}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{R_0} \frac{\partial u}{\partial \varphi}, \quad \gamma_{\rho\alpha} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\rho}{\partial \alpha} + \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{u_\alpha}{\rho} \right) \quad (3)$$

Интегрируем выражение радиальной деформации ε_ρ с учетом (1) и (2), исходя из условия сохранения внутреннего радиуса трубы r ; полученное решение:

$$u_\rho = \frac{\sin \alpha}{4R_0} (r^2 - \rho^2) \quad (4)$$

Из соотношений (2) и (3) следует, что

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial \alpha} = \frac{-\rho^2 \sin \alpha}{2R_0} - u_\rho$$

Подставляем выражение u_ρ (4) и получаем:

$$u_\alpha = \frac{\cos \alpha}{4R_0} (r^2 + \rho^2) \quad (5)$$

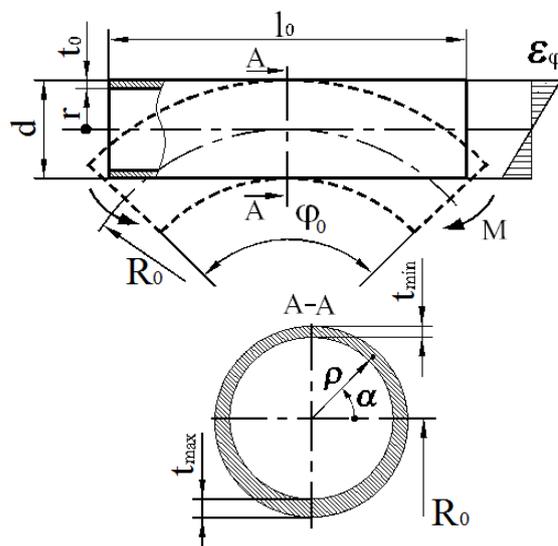


Рисунок 1 – Расчетная схема изгиба трубы моментом

Деформация сдвига $\gamma_{\rho\alpha}$ согласно (3) и полученным формулам перемещений равняется нулю.

Уточним положение нейтральной поверхности исходя из условия равенства нулю продольной силы, или равнодействующей напряжений σ_φ , нормальных к поперечному сечению изогнутой трубы. Согласно эпюре деформаций ε_φ на рисунке 1 нейтральная линия проходит через ось трубы, что при изменившейся толщине стенки t противоречит сформулированному выше условию

$$\int_F \sigma dF = 0, \quad (6)$$

где F – площадь поперечного сечения трубы.

Пусть $\sigma_\varphi = \pm \sigma_s$, а напряжение текучести σ_s постоянно, исходя из так называемой модели идеально пластичного материала. В таком случае нейтральная линия должна делить площадь сечения трубы на две равновеликие части, чтобы равнодействующая положительных и отрицательных напряжений σ_φ равнялась нулю.

Используем приближенную формулу

$$\varepsilon_\varphi = \frac{d(\sin \beta + \sin \alpha)}{2R_0}, \quad (7)$$

в которой содержится угол β , характеризующий положение нейтральной поверхности относительно оси трубы, рисунок 2.

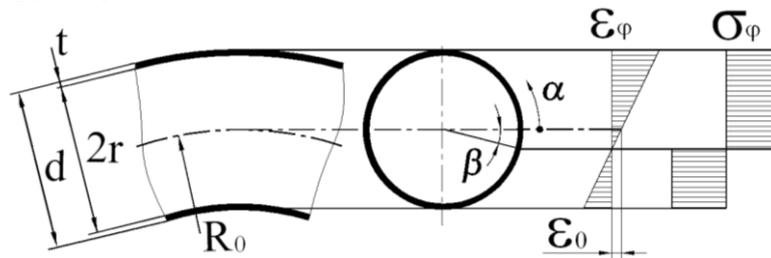


Рисунок 2 – Смещение нейтральной поверхности относительно оси изогнутой трубы

Погрешность формулы (7), незначительная для тонкостенной трубы, возрастает с увеличением толщины стенки и диапазона значений радиальной координаты материального волокна трубы $0,5d \geq \rho \geq r$. Принимая $\rho \approx d/2$, можно подставить в интеграл (6) выражение $dF = 0,5dt d\alpha$. Переменную толщину стенки трубы выражаем через радиальную деформацию

$$t = (1 + \varepsilon_\rho)t_0. \quad (8)$$

Величина t меньше исходной толщины стенки t_0 в диапазоне $\pi + \beta > \alpha > -\beta$, в диапазоне $\pi + \beta < \alpha < 2\pi - \beta$ стенка утолщается. Границы этих диапазонов служат пределами интегрирования в записи условия

$$\int_{-\beta}^{\pi+\beta} t d\alpha = \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\beta} t d\alpha, \quad (9)$$

которое вытекает из равенства площадей частей сечения трубы, разделенных нейтральной линией.

Заменяем в подынтегральных выражениях переменную t выражением (8) с подстановкой $\varepsilon_\rho = -0,5\varepsilon_\varphi$, где ε_φ выражается согласно (7). После интегрирования (9) и преобразований получаем уравнение одной неизвестной β

$$\beta \left(\frac{2R_0}{r} - \sin \beta \right) = \cos \beta \quad (10)$$

Данное уравнение относится к классу трансцендентных и решается с помощью компьютерных программ типа MathCAD. Пример рассчитанного значения: $\beta = 0,126$ рад при $R_0/d = 2$ означает, что относительное удлинение оси трубы ε_0 (см. рисунок 2) составит согласно (7) примерно $0,06d/R_0$, т.е. около 0,03.

Эпюра деформаций ε_φ на рисунке 3 получается сложением аналогичной эпюры, показанной на рисунке 1, с величиной ε_0 .

Исходная формула относительного изменения длины материального волокна (1) не учитывает влияние перемещений u_p и u_α , существенное при малых радиусах гибки; в уточненном виде

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R_0} + \frac{u_p \sin \alpha}{R_0} + \frac{u_\alpha \cos \alpha}{R_0} + \varepsilon_0 \quad (11)$$

Влияние перемещения u_p усиливается в связи с так называемой овализацией сечения трубы, которая проявляется на практике, главным образом, в уменьшении его высоты.

Количественная оценка овализации, содержащаяся в работе [2], основывается на методе Ритца и ряде допущений, необходимых для решения в квадратурах вариационных уравнений [3]:

$$\iiint_V \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_i} dV = 0, \quad (12)$$

где V – объем деформируемого тела;

Γ – интенсивность деформаций сдвига;

v_i – варьируемые параметры.

Один варьируемый параметр v_1 включаем в формулу перемещения u_α (5) вместо коэффициента $1/4$, другой – v_2 содержит функция овализации

$$O = \frac{v_2 r^3 \sin^2 \alpha}{\rho R_0} \quad (13)$$

Данная функция является компонентом радиального перемещения u_p , формула которого [2], ввиду искажения сечения, оказывается существенно отличной от (4). Этот компонент может представлять перемещение u_p в формуле деформации ε_φ (11), поскольку составляет его преобладающую часть. С учетом сказанного

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R_0} + \frac{v_2 r^3 \sin^3 \alpha}{\rho R_0^2} + \frac{v_1 \cos^2 \alpha}{R_0^2} (r^2 + \rho^2) + \varepsilon_0 \quad (14)$$

Решение системы двух (по числу варьируемых параметров) вариационных уравнений (12) дает при $\varepsilon_0 = 0$ значение $v_1 \approx 1/4$ и

$$v_2 \approx \frac{-11\bar{d}}{32\bar{R}}, \quad (15)$$

Здесь \bar{d} и \bar{R} обозначают соответственно отношение наружного диаметра трубы к внутреннему $d/(2r)$ и относительный радиус изгиба R_0/d . Уменьшение высоты сечения Δd принимаем равным удвоенному перемещению внутренней границы сечения согласно формуле (13) при $\sin^2 \alpha = 1$, откуда

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{v_2}{2\bar{R}\bar{d}^2} \quad (16)$$

Одновременное с моментом действие растягивающей осевой силы существенным образом сказывается на овализации сечения. Относительное удлинение оси трубы ε_0 может быть значительно большим, по сравнению со значениями, которые дает учет разнотолщинности стенки изогнутой трубы и формула (10).

Обозначим ε^* деформацию растяжения ε_0 , при которой $\beta = \pi/2$ и соответственно $\varepsilon_\varphi|_{\alpha=-0,5\pi} = 0$, т.е. нейтральная поверхность деформаций располагается на границе сечения трубы – в его нижней точке на рисунке 2. При этом относительное удлинение оси трубы

$$\varepsilon^* = \frac{1}{2\bar{R} - 1}.$$

В таблице приведены результаты решения системы уравнений (12) для относительного диаметра $\bar{d} = 1,1$ в зависимости от степени растяжения оси трубы.

Таблица 1 – Параметры деформированного состояния трубы, подвергнутой изгибу с растяжением

R_0/d	4			8		
$\varepsilon_0/\varepsilon^*$	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8
v_1	0,246	0,244	0,239	0,248	0,247	0,245
v_2	-0,202	-0,327	-0,576	-0,156	-0,273	-0,507

Значения варьируемых параметров v_1 мало отличаются от 1/4. Это значит, что деформация ε_α остается примерно такой же, как при изгибе без растяжения, а деформация ε_p уменьшается на величину ε_0 .

Варьируемый параметр v_2 , отвечающий за овализацию сечения трубы, находится в прямой зависимости от деформации растяжения, что иллюстрируют графики, приведенные на рисунке 3; соответствующие расчеты выполнялись для относительного диаметра трубы $\bar{d} = 1,1$.

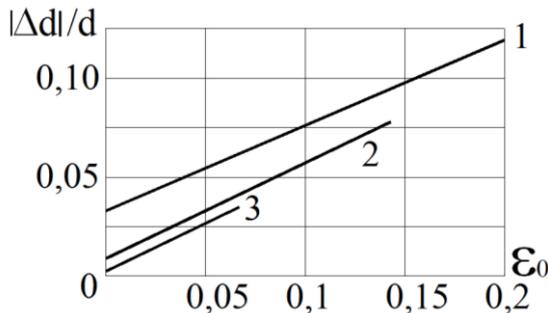


Рисунок 3 – Уменьшение высоты сечения трубы при изгибе с одновременным растяжением; радиус изогнутой оси: $R_0/d = 2$ (1), 4 (2), 8 (3)

Графики 2 и 3 располагаются в пределах деформации $\varepsilon_0 = \varepsilon^*$, им соответствуют сравнительно большие радиусы гибки и рассчитанные показатели овальности сечения $|\Delta d/d|$, не достигающие 10%. Значения $|\Delta d/d|$ возрастают с уменьшением R_0/d и относительной толщины стенки трубы, т.е. величины \bar{d} .

Расчет изгиба труб с учетом изменения толщины стенки и высоты сечения необходим для обоснованного назначения радиуса изогнутой оси трубопровода и ограничений на

показатели утонения и овализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Franz, W.-D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1988. – 237 s.
2. Вдовин С.И., Михайлов В.Н. Вариационная оценка деформаций пластического изгиба трубы //Изв. ТулГУ. Серия “Технологические науки”. Тула: Изд-во ТулГУ. – 2009. Вып. 1. Часть 1. С. 85–91.
3. Теория обработки металлов давлением. Под ред. И.Я.Тарновского /Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А., Колмогоров В.Л., Трубин В.Н., Вайсбурд Р.А., Тарновский В.И. М.: Металлургиздат. 1963. – 672 с.

Вдовин Сергей Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Автопласт»
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел.: (4862) 41-68-77 и 55-98-25
 E-mail: avtopl@yandex.ru

Михайлов Валерий Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Доцент кафедры «Автопласт»
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел.: (4862) 41-98-59
 E-mail: avtopl@yandex.ru

Москвитин Сергей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29
 Тел. (4862) 54-25-98

Мальцев Денис Николаевич

Орловский государственный технический университет
 аспирант каф. «Автопласт»
 Рабочий и домашний телефоны: (4862) 41-98-35, 8-905-165-4990

РАСЧЕТ МГНОВЕННОЙ ПЛОЩАДИ ПЯТНА КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ КОЛПАКОВ МАСЛЯНЫХ ФИЛЬТРОВ

Предложена методика решения геометрической задачи о пересечении инструмента и заготовки при ротационной вытяжке прямым способом полых осесимметричных тонкостенных изделий (колпаков масляных фильтров).

Ключевые слова: пятно контакта, ротационная вытяжка, колпак, масляный фильтр, осесимметричные изделия.

The technique of the decision of a geometrical problem about tool and preparation crossing is offered at a rotary drawing in the direct way axisymmetric details (caps of oil filters).

Key words: a contact stain, a rotary drawing, a cap, the oil filter, axisymmetric details.

Важной проблемой, стоящей перед современным машиностроением, является повышение эффективности и конкурентоспособности процессов изготовления изделий из металлов, обеспечивающих максимально возможные эксплуатационные характеристики.

При изготовлении колпаков масляных фильтров в настоящее время находит всё более широкое использование ротационная вытяжка. Это объясняется применением новых схем деформирования, более глубоким изучением основ механики процессов формообразования оболочек, приложением локализованной нагрузки, разработкой новых видов прогрессивного оснащения, созданием высокопроизводительных давяльных станков, в том числе с программным управлением. Главное же достоинство такого изготовления детали – это быстрая переналадка станков на выпуск продукции разных габаритов. А растущая потребность в производстве деталей, наряду с предъявляемыми к ним высокими требованиями по точности геометрической формы, диаметральным размерам, толщине стенки, качеству поверхности и механическим свойствам, связанными с обеспечением надёжности эксплуатации деталей в условиях агрессивной среды, высоких температур и давлений, определяет необходимость совершенствования метода их изготовления.

При проектировании технологии и инструмента для обработки деталей машин деформированием с локальным контактом инструмента и заготовки, к которым относится ротационная вытяжка, необходимо иметь информацию о силах, действующих на инструмент при деформировании заготовки. Величина силы, действующей на инструмент при пластическом деформировании, может быть рассчитана по формуле

$$P = pF_k,$$

где p – давление на инструмент при пластическом деформировании;

F_k – площадь пятна контакта инструмента и заготовки.

Давление при холодном пластическом деформировании зависит от механических свойств материала заготовки, скорости деформирования, накопленной степени деформации и условий течения металла. Теоретическое определение давления является весьма затруднительным. Его точное значение может быть получено в настоящее время методами теории пластичности лишь для некоторых простых случаев, например вдавливания пуансона в полуплоскость [4]. Численные методы, например метод конечных элементов, не всегда обеспечивают приемлемую надёжность результатов, в особенности для сложных случаев деформирования. В связи с этим давление в настоящее время определяется, как правило, экспериментальным путем для каждого конкретного случая обработки.

Площадь пятна контакта инструмента и заготовки может быть определена путем решения геометрической задачи о пересечении инструмента и заготовки. Задача о пересечении двух тел в пространстве и нахождении площади поверхности требует решения системы

дифференциальных уравнений и двойного интеграла. Их аналитическое решение возможно в настоящее время только для некоторых наиболее простых случаев. В связи с этим для расчета площади пятна контакта инструмента и заготовки при пластическом деформировании с локальным контактом применяются приближенные методики, например [1, 2, 3].

Рассмотрим схемы взаимодействия деформирующего конического ролика с материалом заготовки при ротационной вытяжке деталей прямым способом. Геометрические характеристики ролика: радиус (диаметр) - R_p ($D_p = 2R_p$), угол ролика - α_p ; геометрические характеристики заготовки: текущий радиус (диаметр) детали на входе в очаг пластической деформации - R_g ($D_g = 2R_g$), толщина стенки - t_0 ; геометрические характеристики детали: радиус (диаметр) изготавливаемой детали - R_d ($D_d = 2R_d$), толщина детали - t_k ; радиус (диаметр) оправки - r_o ($d_o = 2r_o$).

За один оборот заготовки ролик переместился на величину рабочей подачи S .

Рассмотрим процесс ротационной вытяжки тонкостенной заготовки коническими роликами с углом конусности α_p и степенью деформации $\varepsilon = 1 - t_k/t_0$ по прямому способу (рисунок 1). За один оборот заготовки ролик переместился на величину рабочей подачи S . При подаче ролика на величину S фактическая подача будет $S_\phi = S t_k/t_0$. Это справедливо в предположении, что вдоль осевой реализуется плоская деформация [6].

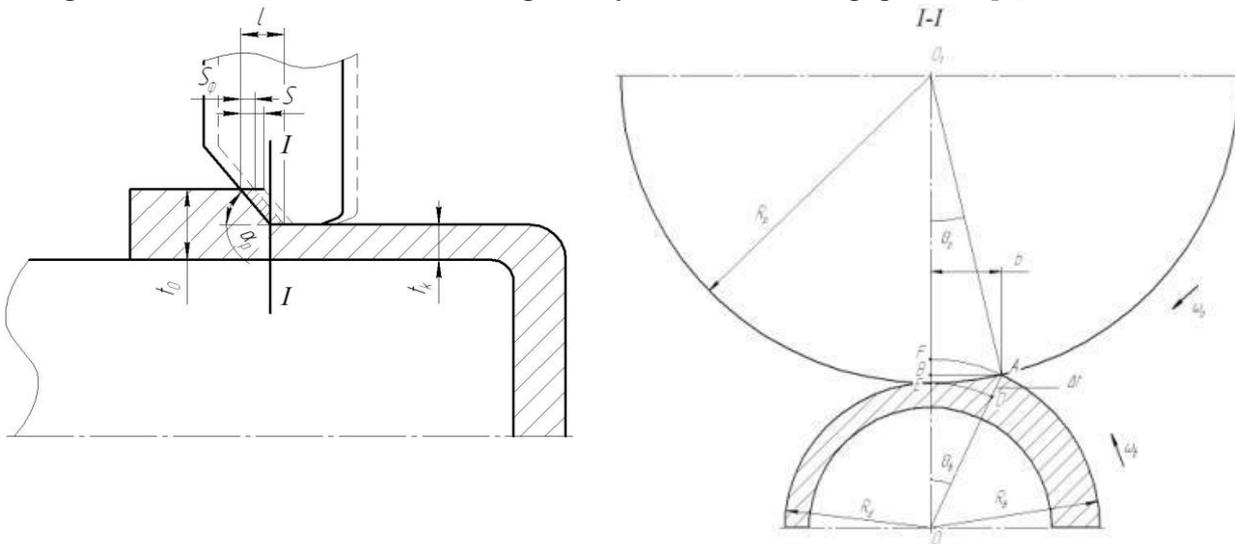


Рисунок 1 – Схема очага деформации при ротационной вытяжке

Максимальный угол контакта θ_g с заготовкой:

$$\theta_g = \left[\frac{2S_\phi R_p \operatorname{tg} \alpha_p}{R_g (R_g + R_p)} \right]^{1/2}, \text{ если } S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p \leq \Delta t; \quad (1)$$

$$\theta_g = \left[\frac{2R_p \Delta t}{R_g (R_g + R_p)} \right]^{1/2}, \text{ если } S_\phi \operatorname{tg} \alpha_p \geq \Delta t. \quad (2)$$

Заметим, что выражения (1) и (2) получены с учетом того, что величины Δt и S_ϕ малы по сравнению с величиной радиуса ролика R_p .

Угол θ_g зависит от фактической подачи S_ϕ , изменения толщины стенки детали Δt , радиусов ролика R_p и заготовки R_g , а также формы ролика (угла конусности ролика α_p). Максимальная протяженность контакта ролика с заготовкой в осевом направлении

$l = \Delta t \operatorname{ctg} \alpha_p + S_\phi$. Ширина зоны контакта в каждом сечении может быть определены по формуле $b = R_\epsilon \sin \theta_\epsilon$.

Пластическая деформация под роликом проходит в сравнительно короткий промежуток времени $\Delta t_{\epsilon p}$, необходимый для прохождения зоны контакта материала заготовки с роликом. В течение этого промежутка времени материал течет под роликом в осевом направлении. Заметим, что угол контакта материала заготовки с роликом в основном постоянный и переменный в начальном и конечном участках очага деформации.

Проекция контакта поверхности заготовки и ролика на площадь с нормалью z вычисляется по формуле

$$F_\kappa = \int_{R_0}^{r_k} \int_0^{\theta_\epsilon} r dr d\theta.$$

Учитывая, что уравнение линии контакта в цилиндрической системе координат имеет вид $r_k = \frac{R_\epsilon - \Delta t + z \operatorname{tg} \alpha_p}{\cos \theta}$, получим

$$F_\kappa = \frac{l}{2} [(R_\epsilon - \Delta t + z \operatorname{tg} \alpha_p)^2 - r_0^2 \theta_\epsilon].$$

Таким образом, предложенная методика вполне может быть использована для расчета величины мгновенного пятна контакта при ротационной вытяжке прямым способом полых осесимметричных тонкостенных изделий. Зная характер изменения площади контакта можно подобрать рациональные конструктивные параметры деформирующего инструмента и технологические режимы обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А.В. Расчет профиля заборной части резбонакатного инструмента [Текст] / А.В. Киричек, И.Б. Кульков, А.Н. Афонин // СТИН, 2000, №8, - С. 20-25. 2.
2. Могильный, Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках [Текст] – М.: Машиностроение, 1983. – 192с.
3. Лапин, В.В. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев [Текст] / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов, Ю.И. Сизов. - Л.: Машиностроение, 1986. – 228 с.
4. Осадчий, В.Я. Теория и расчеты технологических параметров штамповки выдавливанием [Текст] / В.Я. Осадчий, А.Л. Воронцов, И.И. Безносиков. - М.: МГАПИ, 2001. – 307 с.
5. Степанский, Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. [Текст] – М.: Машиностроение, 1979 – 215с.: ил.
6. Трегубов, В.И. Силовые режимы ротационной вытяжки цилиндрических деталей на специализированном оборудовании [Текст] / В.И. Трегубов, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2005. - № 1. – С. 17 – 23.

Киричек Андрей Викторович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
директор Технологического института ОрелГТУ
тел./ fax (4862)555524,
E-mail: avk@ostu.ru

Мальцев Анатолий Юрьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
тел./ fax (4862)555524

А.М. КОЗЛОВ, Д.В. БОЛГОВ

ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Предложены рекомендации для назначения режимов совмещенной обработки отверстий.

Ключевые слова: технология обработка, отверстия.

Advices is offering for conditions of fetch filtering of holes.

Key words: technology, processing, apertures.

Одной из основных задач, стоящих перед современным машиностроительным производством, является значительная интенсификация технологических процессов при обеспечении стабильного высокого качества деталей. Прогресс машиностроения напрямую связан с постоянным повышением требований к надежности и долговечности выпускаемых машин и механизмов. Поэтому к ответственным деталям машин: двигателям внутреннего сгорания, силовым цилиндрам гидравлических и пневматических приводов, коробкам передач, деталям топливной аппаратуры и др., предъявляются высокие требования по точности и качеству поверхности. Качество таких деталей определяется точностью формы и шероховатостью поверхности, обеспечиваемой при изготовлении, и влияет на их работоспособность и эксплуатационный ресурс. Технологическое обеспечение повышенных требований деталей этого класса достигается с помощью такого процесса абразивной обработки, как хонингование. Хонингование в результате использования современных режущих материалов и прогрессивного оборудования получило широкое применение в машиностроении при чистой обработке поверхностей.

Существующие технологические способы хонингования, обладая рядом преимуществ перед остальными абразивными процессами, не всегда обеспечивают необходимую производительность. При обработке точных отверстий в тонкостенных деталях типа гильз цилиндров возникают специфические трудности, связанные с малой жесткостью этих деталей. При использовании традиционных методов обработки погрешность формы обрабатываемого отверстия не устраняется или устраняется незначительно. В производственных условиях для достижения требуемой точности применяется замедление скорости продольного хода и выдержка вращающейся хонинговальной головки в конце каждого хода, а также периодическая правка хонинговальных брусков.

Повышение точности формы деталей при хонинговании с учетом требуемой производительности и себестоимости обработки является актуальным. Кроме того, исследование механизма и особенностей операции хонингования позволит получать стабильное качество продукции машиностроительного комплекса.

Традиционная технология окончательной обработки отверстий гильз цилиндров включает четыре последовательные операции: черновое, получистовое, чистовое и окончательное хонингование. Такой технологический процесс не всегда эффективен.

В качестве образцов для экспериментальных исследований использовались гильзы цилиндров из специального чугуна. Обработка деталей проводилась на хонинговальном станке модели 3К83У шестибрусковой хонинговальной головкой с шарнирной передающей частью; абразивно-лезвийным инструментом [1, 2, 3]. Абразивно-лезвийный инструмент имеет рабочие элементы: абразивные бруски и расточные резцы (рисунок 1).

Кинематика предложенного процесса хонингования–сверхтонкого точения: инструменту сообщается вращательное движение и возвратно-поступательное перемещение; радиальный разжим производится для колодок с абразивными брусками, колодки для тонкого точения в радиальном направлении не работают.

При обработке абразивно-лезвийным инструментом было выявлено, что в некоторых случаях, при определенных условиях, резцы попадают в уже прорезанные ранее канавки. На этих участках поверхности заготовки не происходит процесса резания, а идет пластическое оттеснение слоя металла, расширение канавки.

Для устранения этого нежелательного эффекта необходимо разработать определенные требования к режимам обработки. Если инструмент имеет несколько ярусов лезвийных элементов, то резцы с последующего яруса попадают в канавки, прорезанные лезвиями с предыдущего яруса. После перебега, в момент входа в отверстие резцы также попадают в уже прорезанные ранее канавки.

Достаточно обеспечить определенное расстояние между ярусами с учетом режимов обработки. Известно, что время одного оборота рассчитывается по формуле:

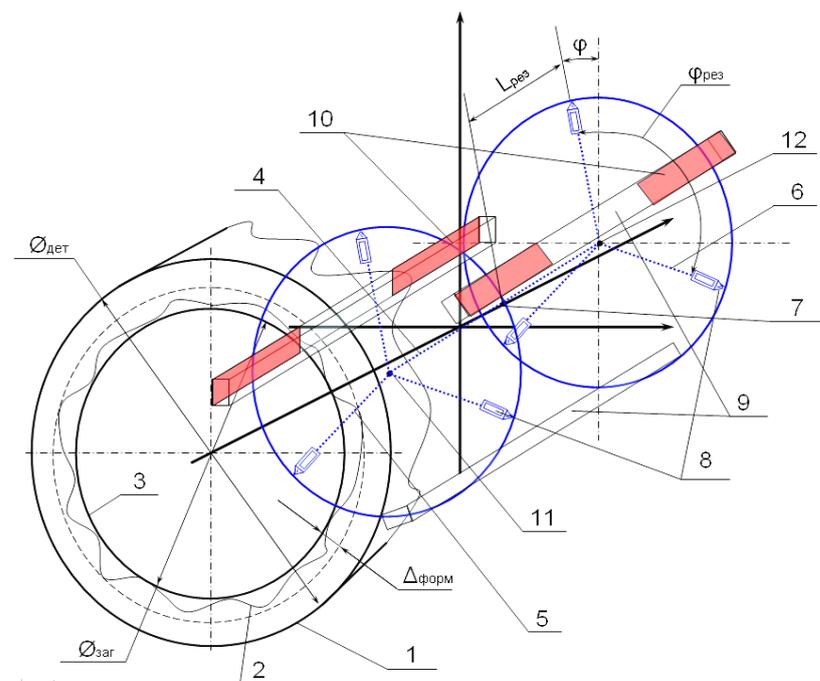


Рисунок 1 – Схема абразивно-лезвийного инструмента:

1 – поверхность детали ($\varnothing_{дет}$ – диаметр детали);

2 – реальный радиус заготовки;

3 – поверхность заготовки ($\varnothing_{заг}$ – диаметр заготовки);

4 – ось инструмента; 5, 6 – ярус резцов;

7 – центр инструмента; 8 – резцы расточные;

9 – абразивный брусок; 10 – участок, соответствующий

1/3 длины бруска; 11, 12 – центр сечения яруса резцов;

$\Delta_{форм}$ – погрешность в поперечном сечении;

$L_{рез}$, $\varphi_{рез}$, φ – параметры линейного и углового расположения резцов

$$t_{об} = \frac{2\pi r}{V_{окр}}, \quad (1)$$

где $V_{окр}$ – окружная скорость инструмента;

r – радиус инструмента.

Время прохождения расстояния между двумя соседними ярусами - L рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{L}{V_{вп}}, \quad (2)$$

где $V_{вп}$ – скорость возвратно-поступательного перемещения.

Таким образом, чтобы резец 1 (с первого яруса) не оказался в точке 2, достаточно обеспечить условие:

$$\frac{2\pi r}{V_{окр}} \neq \frac{L}{V_{вп}}, \quad (3)$$

или

$$\frac{V_{вп}}{V_{окр}} \neq \frac{L}{2\pi r}. \quad (4)$$

За все время обработки АЛИ совершит M - количество двойных ходов:

$$M = \frac{V_{вп} \cdot t_{об}}{2 \cdot H}, \quad (5)$$

где H – ход инструмента.

Очевидно, что необходимо стремиться к равномерному распределению рисок по обрабатываемой поверхности, т.е. все M – риск будут распределены по поверхности через угловое расстояние:

$$\Delta_{\varphi} = 2 \cdot \pi / M, \quad (6)$$

т.е.

$$\Delta_{\varphi} = 2 \cdot \pi / \frac{V_{\text{вн}} \cdot t_{\text{об}}}{2 \cdot H}, \quad (7)$$

Преобразуем:

$$\Delta_{\varphi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot H}{V_{\text{вн}} \cdot t_{\text{об}}}. \quad (8)$$

Таким образом, необходимо, чтобы за один двойной ход инструмент совершил целое количество полных оборотов:

$$n = \text{Окр} \left(\frac{2 \cdot H}{V_{\text{вн}}} \cdot V_{\text{окр}} / (2 \cdot \pi \cdot r) \right) + \Delta_{\varphi} / (2 \cdot \pi), \quad (9)$$

Следовательно, скорость вращения абразивно-лезвийного инструмента должна рассчитываться по формуле:

$$V_{\text{окр}}^* = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \left(\text{Окр} \left(\frac{H \cdot V_{\text{окр}}}{V_{\text{вн}} \cdot \pi \cdot r} \right) + \frac{2 \cdot H}{V_{\text{вн}} \cdot t} \right), \quad (10)$$

где $V_{\text{окр}}^*$ – скорректированное рекомендуемое значение скорости вращения.

Необходимо также учесть, что на практике получить равномерно распределенную сетку рисок достаточно сложно, так как гидравлическая система станка вносит свои коррективы в соотношение окружной скорости и возвратно-поступательной. Это связано с тем, что на практике выполнение условий зависит от жесткости гидравлического привода станка, обеспечивающего возвратно-поступательные движения инструмента.

Технологический процесс окончательной обработки отверстий гильз цилиндров, включающий совмещенную обработку и чистовое хонингование, позволил повысить производительность обработки отверстий на 20% по сравнению с действующим производственным вариантом, точность обработки с 18...12 мкм до 8...5 мкм. Совмещенное хонингование выполнялось на следующих режимах: окружная скорость инструмента $V_{\text{ок}} = 20...90$ м/мин; скорость возвратно-поступательного перемещения $V_{\text{вп}} = 3...18$ м/мин; давление хонинговальных брусков на обрабатываемую поверхность $p = 0,5$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, А.М. Совершенствование финишной обработки с использованием абразивно-лезвийного метода / А.М. Козлов, Д.В. Болгов // Значение научной работы в процессе подготовки конкурентоспособных специалистов для предприятий Удмуртской республики: сб. трудов науч.-методической конф.- Ижевск: Воткинский филиал ИжГТУ, 2006. С. 240-243.
2. Козлов, А.М. Повышение точности финишной обработки отверстий гильз цилиндров / А.М. Козлов, Д.В. Болгов // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. трудов 5-ой междунар. науч.-техн. конф.- Брянск: БГИТА, 2006. Вып.5. С. 75-76.
3. Козлов, А.М. Моделирование точности формы при совмещенном методе обработки: хонингование-расточивание / А.М. Козлов, Д.В. Болгов // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. научн. трудов 6-ой междунар. науч.-техн. конф.- Брянск: БГИТА, 2006. Вып.6. С. 38-40.

Козлов А.М.

Доктор технических наук, профессор
Липецкий государственный технический университет, Липецк
тел. (4842) 36-81-85,
E-mail: dmbolgov@mail.ru

Болгов Д.В.

Кандидат технических наук
Липецкий государственный технический университет, Липецк
тел. (4842) 36-81-85,
E-mail: dmbolgov@mail.ru

В.Н. ХРОМОВ, В. Н. КОРЕНЕВ, А. Ю. РОДИЧЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОСНАСТКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Разработаны технология и оснастка для изготовления биметаллического подшипника скольжения, позволяющие снизить стоимость из-за экономии цветного металла бронзы, при высоких эксплуатационных характеристиках подшипника, повысить прочность сцепления напыленного слоя с основой и усталостной прочностью деталей, за счет увеличения контактной и опорной поверхности основы, упростить замену накатной головки, исключить дополнительные регулировки, а также упростить обработку деталей в труднодоступных местах.

Ключевые слова: технология, оснастка, биметаллический подшипник скольжения, накатная головка.

The technology and equipment for manufacturing of friction bimetallic bearing are developed what allows to decrease the cost because of economy of bronze base metal at bearing high performance, to increase adhesive strength of evaporated layer with a basis and fatigue strength of details due to extension of a contact and supporting surfaces of the basis, to simplify knurling head replacement, to exclude additional adjustments and also to simplify details processing in remote places.

Key words: technology, equipment, friction bimetallic bearing, knurling head.

Задний мост автогрейдера и задняя подвеска автомобилей КамАЗ, ЗИЛ-130Г, КрАЗ, имеет разное конструктивное решение балансирного устройства, в состав которого входят втулки (подшипники скольжения), изготовленные из антифрикционного материала, работающие в условиях абразивного изнашивания. Эти подшипники лимитируют ресурс заднего моста автогрейдера (задней подвески автомобилей) и требуют восстановления либо замены новыми – ремонтного размера.

При проведении капитального ремонта автомобилей требуется ремонт задней подвески, а анализ износного состояния подшипников скольжения показал, что внутренняя цилиндрическая поверхность бронзовых втулок выходит за пределы размеров допустимых при ремонте.

Анализ существующих материалов и технологий изготовления и восстановления подшипников скольжения позволяет остановить свой выбор на технологии восстановления подшипника скольжения из цельной бронзы путем постановки дополнительной детали ремонтного размера.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Разработка относится к области машиностроения и ремонта машин и может быть использована при восстановлении изношенных деталей, в частности, подшипников скольжения.

Недостатком существующей технологии является высокая стоимость подшипника, высокий расход напыляемого материала, и низкие эксплуатационные характеристики получаемого подшипника скольжения [1].

Задачей разработки является снижение стоимости получаемого подшипника скольжения, снижение расхода напыляемого материала, повышение эксплуатационных характеристик получаемого подшипника скольжения.

Поставленная задача достигается тем, что в известной технологии, заключающейся в изготовлении втулки, подготовке поверхности и нанесении на внутреннюю цилиндрическую поверхность покрытия газотермическим напылением порошка бронзы и последующей механической обработке, согласно разработке, втулку изготавливают стальной с наружным диаметром, равным посадочному диаметру узла и с внутренним диаметром стальной втулки больше номинального, а подготовку поверхности производят нарезанием «рваной» резьбы с последующим косым сетчатым накатыванием, после чего производят напыление и механическую обработку.

Технология осуществляется следующим образом. В качестве примера детали берут подшипник скольжения балансирной подвески среднего и заднего ведущих мостов автомобиля КамАЗ-5320. Диаметры внутренней и наружной поверхностей составляют соответственно $\varnothing 88^{+0,29}$ мм $\varnothing 100_{-0,29}$ мм, длина подшипника $80_{+0,4}$ мм.

Изготавливается стальная втулка 1 (рисунок 1) с наружным диаметром, равным посадочному диаметру узла, куда устанавливается подшипник скольжения. Для изготовления стальной втулки используется заготовка: Труба $\frac{114 \times 20 \text{ГОСТ} 87-78}{\text{В} 20 \text{ГОСТ} 8731-74}$, длина $L=80_{+0,4}$ мм.

Внутренний диаметр стальной втулки изготавливается большим номинального на $1,5 \dots 4$ мм. На внутренней цилиндрической поверхности стальной втулки 1 нарезается «рваная» резьба на глубину $0,5 \dots 1,00$ мм при шаге резьбы $1,75 \dots 2,00$ мм, далее на нарезанную резьбу наносится косо сеччатое накатывание. Шаг рифления принимается $1,6$ мм.

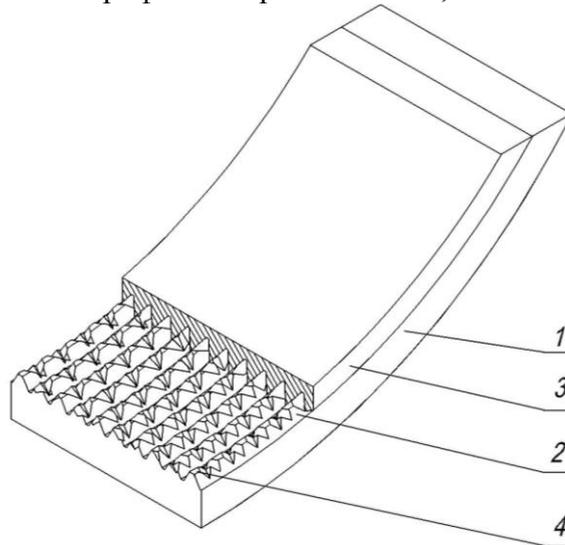


Рисунок 1 – Фрагмент подшипника скольжения, полученный по предлагаемой технологии:
 1 – втулка стальная, 2 – поверхность после нарезания «рваной» резьбы и косо сеччатого накатывания, 3 – напыленный антифрикционный слой порошка бронзы, 4 – элемент типа «усеченная пирамида».

На подготовленную таким образом внутреннюю поверхность 2 напыляется газотермическим способом порошок бронзы 3 (ПР-БрАЖНМц 8,5-1,5-5-1,5, ПР-БрАЖ 9,5-1 или ПР-БрОЦС 5-5-5) при помощи газопламенной горелки «Термика-универсал» антифрикционный слой $0,75 \dots 2$ мм с высокой прочностью сцепления, который обеспечивает компенсацию величины износа.

Сочетанием нарезанной резьбы с косым сеччатым накатыванием получается поверхность 2. Полученная поверхность 2 позволяет обеспечить высокую прочность сцепления напыляемого антифрикционного слоя 3 со стальной основой 1 во всех направлениях. Поверхность 2, во всех направлениях, защищает от сдвига и проворота напыленный слой 3 относительно стальной основы 1. Кроме того, профиль полученной поверхности 2 обеспечивает повышенную грузоподъемность подшипника скольжения за счет полученных на его поверхности после механической обработки элементов типа «усеченная пирамида» 4. В данном случае верхняя часть пирамиды воспринимает нагрузку, передаваемую напыленным слоем 3, а напыленный слой 3, покрывающий боковые поверхности «усеченной пирамиды» 4 улучшает интенсивность теплоотвода из зоны работы подшипника скольжения. В результате накатывания происходит упрочнение поверхностного слоя стальной втулки 1 и увеличение внутреннего диаметра на величину $0,5 \dots 1,0$ от шага рифления.

После напыления осуществляют механическую обработку подшипника до номинального или ремонтного размера.

Сравнительные физико-механические показатели подшипника, полученного предлагаемым способом и известного, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные физико-механические показатели подшипника

Способ восстановления подшипника скольжения	Величина напыляемого слоя, мм	Прочность сцепления, МПа	Относительная износостойкость, %	Относительная несущая способность, %
Прототип	0,3±0,5	85	100	100
Предлагаемый	0,2±0,4	97	120	150

Полученный таким образом подшипник скольжения из стальной втулки с напыленным слоем бронзы имеет более низкую стоимость из-за экономии цветного металла бронзы, при высоких эксплуатационных характеристиках подшипника: прочность сцепления – на 12%, относительную износостойкость – на 20%, относительную несущую способность – на 50%.

ОСНАТКА ДЛЯ НАКАТЫВАНИЯ

Разработка относится к области машиностроения, в частности, к устройствам для накатывания сетчатых рифлений и упрочнения поверхностного слоя методом пластического деформирования.

Недостатками известного устройства являются: сложность замены накатной головки, необходимость дополнительных регулировок для совмещения горизонтальных осей устройства и обрабатываемой детали, а также сложность обработки деталей в труднодоступных местах [2].

Задачей разработки является упрощение замены накатной головки, исключение дополнительных регулировок, а также упрощение обработки деталей в труднодоступных местах.

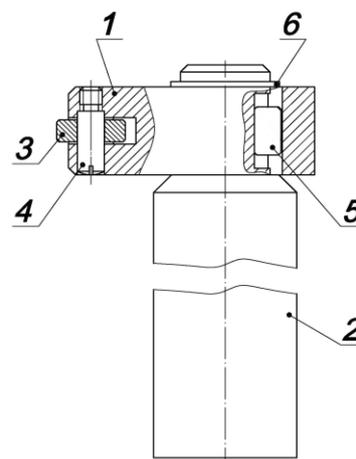
Поставленные задачи решаются тем, что в известном устройстве для накатывания, состоящем из державки, двух роликов, при помощи осей закрепленных в сменной головке, которая соединяется с державкой, согласно разработке для упрощения замены накатной головки соединение головки с державкой осуществляют при помощи шпонки, а для исключения дополнительных регулировок накатная головка имеет возможность поворачиваться на определенный угол относительно державки, кроме того, для упрощения обработки деталей в труднодоступных местах накатная головка выполнена в виде серьги и развернута относительно державки под прямым углом.

Устройство для накатывания (рисунок 2) состоит из накатной головки 1 и державки 2 для крепления ее к суппорту станка в резцедержателе.

Нкатная головка 1 выполнена в виде серьги и развернута относительно державки 2 под прямым углом, чем обеспечено свободное движение устройства в труднодоступных местах. В накатной головке 1 сделаны два параллельных отверстия, в конце которых нарезана резьба. Рабочие элементы представляют собой накатные ролики 3 с упорными поясками, причем накатные ролики 3 имеют косую зубчатую насечку различного направления, что позволяет получить косое сетчатое (перекрестное) накатывание. Ролики 3 закреплены в накатной головке 1 при помощи осей в виде ступенчатых винтов 4.

Винты 4, закрепляющие ролики 3 в накатной головке 1, устанавливаются заподлицо и не выступают за плоскость накатной головки.

Державка 2 выполнена в виде бруска, одна сторона которого имеет форму вала со шпоночным пазом, в котором запрессована шпонка 5, и канавкой под стопорное кольцо 6.



*Рисунок 2 – Предлагаемое устройство для накатывания:
1 – накатная головка, 2 – державка, 3 – накатные ролики, 4 – винты ступенчатые, 5 – шпонка, 6 – кольцо стопорное*

Соединение накатной головки 1 и державки 2 происходит при помощи шпонки 5. От возможности осевого перемещения накатной головки 1 относительно державки 2 устанавливается стопорное кольцо 6.

Совмещение горизонтальных осей устройства для перекрестного накатывания и обрабатываемой детали 7 (рисунок 3 и 4) обеспечено конструкцией шпонки 5 и шпоночных пазов державки 2 и накатной головки 1. Для этого шпонка 5 в паз державки 2 установлена с натягом, а паз в накатной головке 1 выполнен увеличенного размера по ширине, что позволяет при соединении державки 2 и накатной головки 1 получить в месте установки шпонки 5 зазор D (рисунок 5).

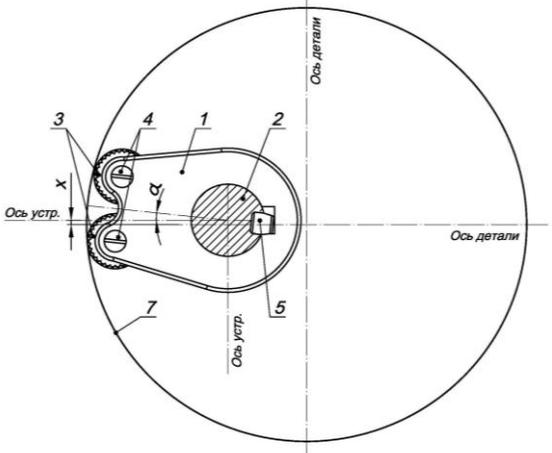


Рисунок 3 – Схема установки накатной головки при несовпадении горизонтальных осей устройства и детали (ось устройства выше оси детали): 1 – накатная головка, 2 – державка, 3 – накатные ролики, 4 – винты ступенчатые, 5 – шпонка, 7 – обрабатываемая деталь, α – угол поворота горизонтальной оси накатной головки относительно горизонтальной оси обрабатываемой детали, X – смещение горизонтальных осей накатной головки и обрабатываемой детали

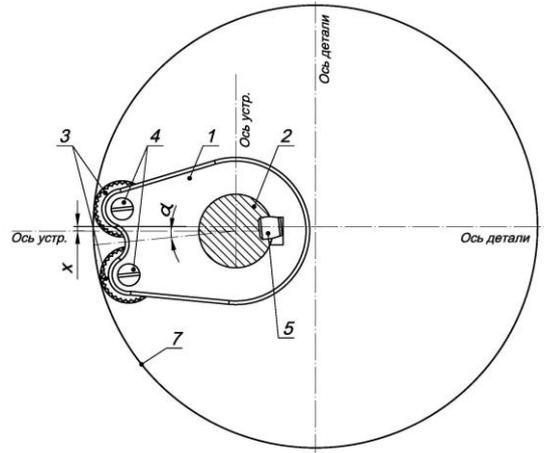


Рисунок 4 – Схема установки накатной головки при несовпадении горизонтальных осей устройства и детали (ось устройства ниже оси детали): 1 – накатная головка, 2 – державка, 3 – накатные ролики, 4 – винты ступенчатые, 5 – шпонка, 7 – обрабатываемая деталь, α – угол поворота горизонтальной оси накатной головки относительно горизонтальной оси обрабатываемой детали, X – смещение горизонтальных осей накатной головки и обрабатываемой детали

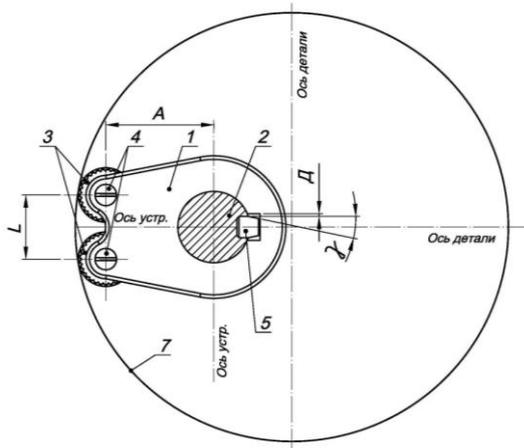


Рисунок 5 – Схема установки накатной головки: 1 – накатная головка; 2 – державка; 3 – накатные ролики; 4 – винты ступенчатые; 5 – шпонка; 7 – обрабатываемая деталь; γ – угол скоса верхних торцов шпонки; D – зазор; L и A – параметры накатной головки конструктивно, зависящие от размеров накатываемой детали

Данный зазор позволяет поворачиваться накатной головке 1 на угол α (рисунок 3 и 4), что при несовпадении горизонтальных осей накатной головки 1 и обрабатываемой детали (расстояние X) (рисунок 3 и 4) позволит получать поверхность необходимого качества без дополнительных регулировок.

Для исключения смятия шпонки 5 в процессе поворота накатной головки 1, торцы шпонки 5 сверху скошены под углом γ (рисунок 5), что позволяет не нарушать плоскость контакта шпонки 5 с пазом накатной головки 1 при повороте ее на угол α . Державка 2 установлена и закреплена в резцедержатель

8 (рисунок 6 и 7) токарного станка (не показан). Деталь 7, подвергаемая обработке, установлена и закреплена в патроне 9 станка.

Работа предложенного устройства осуществляется следующим образом.

Державку 2 подводят к обрабатываемой детали 7, выбирают необходимую величину продольной подачи, по нониусу станка задают глубину врезания накатных роликов 3, включают привод

вращения детали 7, и тем самым осуществляют воздействие накатных роликов 3 на поверхность обрабатываемой детали 7. В результате воздействия роликов 3 на поверхность детали 7 образуется обработанная и упрочненная поверхность.

Для замены накатной головки 1 (изменения размеров L и A) (рисунок 5), при изменении параметров накатываемой детали необходимо извлечь стопорное кольцо 6 из канавки державки 2, снять головку 1 со шпонки 5, установить другую накатную головку 1 и установить стопорное кольцо 6.

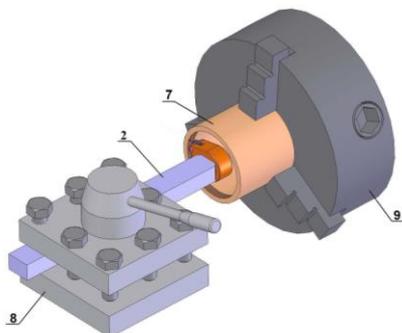


Рисунок 6 – Обработка внутренней поверхности детали: 2 – державка; 7 – обрабатываемая деталь («втулка»); 8 – резцедержатель токарного станка; 9 – патрон токарного станка

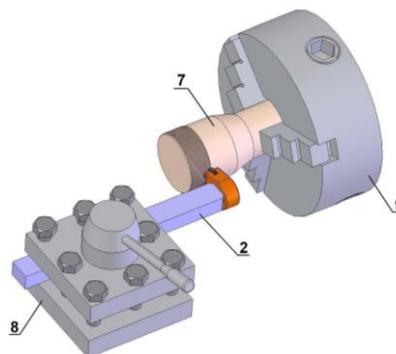


Рисунок 7 – Обработка наружной поверхности детали: 2 – державка; 7 – обрабатываемая деталь («втулка»); 8 – резцедержатель токарного станка; 9 – патрон токарного станка

Таким образом, применение предлагаемого устройства позволяет упростить замену накатной головки, исключить дополнительные регулировки, а также упростить обработку деталей в труднодоступных местах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. №2212324 Российская Федерация, МПК⁷ В23Р 6/00 Способ восстановления подшипников скольжения. [Текст]/А. Ю. Родичев, В. Н. Хромов. - №2001105025; заявл. 21.02.2001; опубл. 20.09.2003 г. Бюл. №26. - 3 с.
2. Шепсенвол А. И. Вспомогательный инструмент в приборостроении. [Текст]/ Шепсенвол А. И. - Л.: Машгиз – 1962. фиг. 75.

Хромов Василий Николаевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор
Тел. +7(4862)43-19-79
E-mail: chrom@orel.ru

Корнев Владислав Николаевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел.: +7(910)304-74-79
E-mail: korenev-vlad@list.ru

Родичев Алексей Юрьевич

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»
Тел. +7(4862)43-19-79
E-mail: alfox777@orel-dormash.ru

УДК 678:621.74.042 - 036.6/8

С.В. ГОНЧАРОВ

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АПК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМИРОВАНИЯ¹

Предложена методика исследования армированных полимерных композитов, изготавливаемых методом центробежного формирования для многономенклатурного производства деталей узлов трения машин и механизмов. Данная методика описывает изучение основных моментов, связанных с получением новых материалов и позволяет быстро и подробно описать их структуру.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, центробежное формирование, методика исследования.

It is the method of research reinforced polymeric composites, produced by centrifugal formation method for multiproduct manufacturing units of friction details of machines and mechanisms. This method describes a main questions studying, which is connecting with new materials generation and allows to describe it's structure quickly and in details.

Key words: polymeric composite material, centrifugal formation, research method.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения качественных АПК необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Разработка устройства и способа формирования АПК центробежным способом.
2. Определение оптимальных соотношений структурных компонентов материала с точки зрения получения наилучших физико-механических и эксплуатационных свойств.
3. Исследование влияния технологических режимов на структуру получаемых материалов.
4. Исследование влияния технологических и конструктивных факторов на физико-механические и триботехнические характеристики материалов.

Структура методики экспериментально-расчетного исследования АПК, изготавливаемых методом центробежного формирования, приведена на рисунке 3.12.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМИРОВАНИЯ АПК

Для изучения влияния термодинамических и технологических факторов способа центробежного формирования на качественные характеристики изделий антифрикционного назначения из ПКМ создан станок СЦФ-4 для центробежного формирования изделий на базе токарного станка типа ЦБК-Р105 (рисунок 1) [1].

Станок содержит станину 9 со шпиндельным узлом 3 и задней бабкой 5, кожух защиты рабочей зоны станка 10, калориферное устройство (тепловентилятор) 11 и электронный блок управления. Защита вращающихся деталей – кожух - выполнен таким образом, чтобы максимально обеспечить герметичность рабочей зоны. Задняя стенка кожуха 10 остается неподвижной, она связана с откидывающейся верхней частью при помощи шарниров. На неподвижной задней части корпуса защиты смонтировано устройство нагрева воздуха 11. Оно выполнено в металлическом корпусе, имеет теплоэлектронагреватель (ТЭН) с максимальной мощностью 1500 Вт и снабжено вентилятором. Температура воздуха на выходе нагревателя может достигать 600 °С. Регулирование температуры нагрева рабочей зоны осуществляется за счет изменения периода импульсов электрического тока в ТЭНе.

¹ Работа выполнена в рамках очередного этапа работ по государственному контракту П1733 от 25.09.2009.

Электронный блок управления ТЭНом собран на микропроцессоре. Температура воздуха на выходе измеряется термопарой, сигнал с которой поступает на контроллер. Требуемая температура задается аналоговым сигналом 0 – 10 В, который поступает с промышленного контроллера «LOGO!» фирмы «Сименс» (рисунок 2) [1].



Рисунок 1 – Методика экспериментально-расчетного исследования АПК, изготавливаемых методом центробежного формования

Система управления включает в себя – частотно-регулируемый привод 13 на 3,7 кВт, промышленный процессор «LOGO!» 14, кнопочный пульт 20, источник питания на 24 В, приборы электрозащиты. Преобразователь частоты SV004iC5-1F-RUS-0.4 имеет векторное управление без датчика в диапазоне частот от 0...400 Гц и изменяет обороты шпинделя в пределах 0-6000 мин⁻¹ [1].

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АПК.

Антифрикционный материал, работающий в тяжелонагруженных узлах трения должен иметь высокую износостойкость, а также высокие прочностные показатели, для повышения которых вводят армирующий наполнитель, некоторые из которых снижают износостойкость, уменьшая долговечность изделия в целом [2]. Для предотвращения данного

факта предлагаемый способ предусматривает условное разделение структуры материала на армирующий и антифрикционный слой.

Для получения качественной армированной структуры полимерного материала необходимы два составляющих: армирующий наполнитель и полимерное связующее. Соотношение данных компонентов представляет собой степень армирования материала, от которой зависят его прочностные характеристики. Армирующий наполнитель должен иметь достаточную жесткость для поддержания формы изделия в изложнице до того момента, пока связующее не пропитает его и полностью не полимеризуется. Связующее должно смачивать армирующий наполнитель, другими словами проникать в пространство между элементарными волокнами, а также обладать достаточной адгезией к наполнителю для равномерной передачи рабочей нагрузки на эти волокна [3].

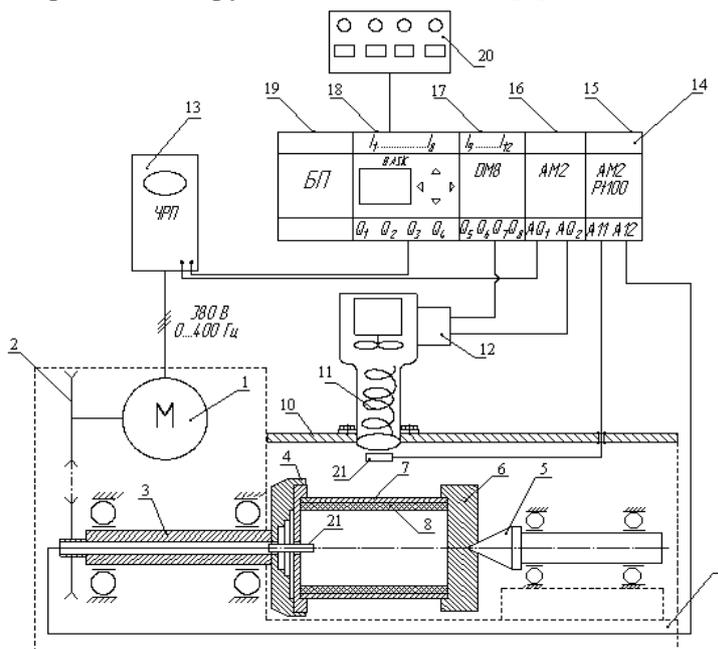


Рисунок 2 – Принципиальная схема станка для центробежного формирования изделий из ПКМ [1]:

- 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача;
- 3 – вал шпинделя; 4 – планшайба; 5 – задняя бабка;
- 6 – крышка формы; 7 – форма; 8 – композит; 9 – станина;
- 10 – кожух защитный; 11 – ТЭН; 12 – блок управления ТЭНом;
- 13 – блок частотного регулирования привода; 14 – контроллер «LOGO!»;
- 15 – аналоговый модуль датчиков температуры AM2;
- 16 – аналоговый модуль AM2 управления ТЭНом; 17 – цифровой модуль DM8;
- 18 – процессорный модуль «LOGO! BASIC»; 19 – блок питания;
- 20 – пульт управления; 21 – датчики температуры

Качество полимерного материала также определяется степенью пропитки армирующего наполнителя, на что влияют такие факторы как температура, частота вращения формы и время формования, совокупность которых определяют технологию получения того или иного требуемого материала, исходя из будущих условий его работы.

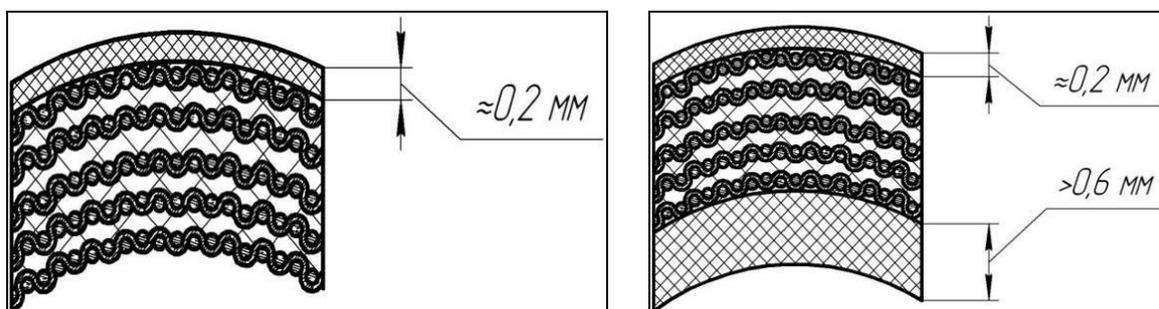
На рисунке 3 приведены варианты структуры материала в зависимости от предельной степени армирования материала.

В случае «а» материал характеризуется повышенным содержанием армирующего материала при недостатке полимерного связующего. В этом случае матрица не связывает отдельные волокна армирующего материала в единое целое, что не позволяет им равномерно воспринимать внешнюю нагрузку, и что, в свою очередь ведет к снижению прочности материала в целом.

В случае «б» материал имеет повышенное содержание полимерного связующего при недостатке армирующего наполнителя. В этом случае получается, что материал становится

«недогруженным», т. е. при одинаковом объеме изделия материал может иметь более высокие прочностные характеристики. Прочность материала становится примерно равным прочности изделия из чистого связующего без армирующего компонента.

Случай, когда в материале достигается оптимальное соотношение армирующего компонента и полимерного связующего, при котором весь армирующий материал становится пропитанным достаточным количеством матрицы, а также добавляется антифрикционный слой, показан на рисунке 4. В этом случае материал получает максимальное упрочнение и оптимальные свойства. Такой материал имеет повышенную твердость, разрывную и прочность на сжатие.



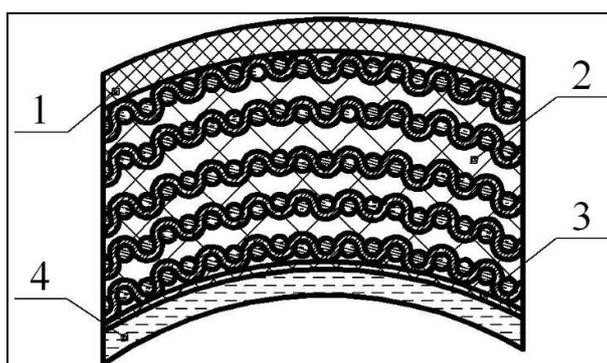
а

б

*Рисунок 3 – Варианты структуры материала:
а – предельная степень армирования превышена,
б – степень армирования меньше предельной*

Разделение антифрикционного материала по слоям позволяет тем или иным наполнителям (в зависимости от назначения слоя) выполнять только те задачи, для которых они вводятся, тем самым оптимизируется структура материала в целом. Расслоение материала не происходит вследствие того, что при формовании изделия не возникает четкой границы между слоями (раздела фаз), а, следовательно, взаимодействие между слоями является когезионным – более предпочтительным чем адгезионное.

Таким образом, предпочтительной структурой антифрикционного слоя материала является структура с достаточной степенью армирования, которая обеспечит оптимальное соотношение между высокими прочностными характеристиками материала и низким коэффициентом трения (рисунок 3б).



*Рисунок 4 – Требуемая структура армированного полимерного материала антифрикционного назначения:
1 – адгезионный слой, 2 – армирующий слой,
3 – пограничный слой, 4 – антифрикционный слой*

ВЫБОР СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ АПК.

Выбор компонентов для армирующего слоя основывается на их совместимости, которая определяется возможностью или невозможностью смачивания эпоксидным связующим волокон армирующего материала.

Возможность смачивания, а, следовательно, и пропитки армирующего материала

связующим определяется по наличию или отсутствию капиллярного эффекта при контакте смолы и армирующего материала. Для этого выбираются образцы прямоугольной формы, на которых отмечается контрольная площадь (1 см^2), на эту площадь наносится смола так, чтобы только смочить эту площадь и не дать ей растечься за пределы (рисунок 5а). После этого образцы выдерживаются в течение суток, а затем проводится визуальный осмотр образцов на предмет капиллярного распространения смолы по волокнам (рисунок 5б).

Также немаловажным фактором для выбора армирующего материала является эластичность его волокон. В идеальном случае рабочее удлинение волокон должно быть равно рабочему удлинению матрицы при растяжении, что обеспечит равномерное перераспределение действующих на материал нагрузок между волокнами армирующего материала и частицами матрицы. В любом другом случае нагрузку сначала будет воспринимать тот компонент, модуль упругости которого больше.

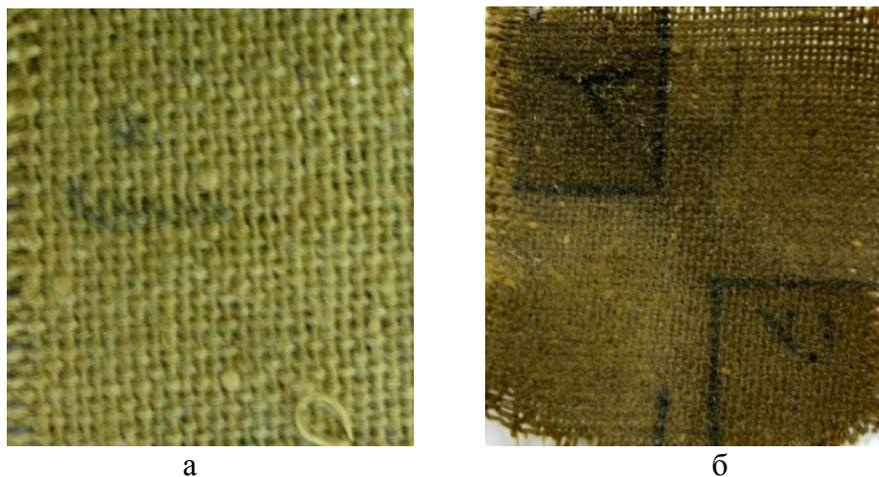


Рисунок 5 – Исследование возможности пропитки армирующего материала на примере арамидной ткани РУСАР®

Армирующий материал должен обладать достаточной жесткостью для того, чтобы удерживаться в форме до того, как он будет пропитан матрицей и последняя полимеризуется. Жесткость ткани измеряется в миллиметрах и определяется в текстильной промышленности следующим образом. На наклонной поверхности с углом в 45° располагают полосу ткани определенной ширины и продвигают в сторону уклона. Как только свес ткани коснется наклонной поверхности, замеряют длину свеса ткани, что и является жесткостью ткани. В рамках данной технологии применимы ткани, жесткость которых составляет не менее 20 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА СЛОЕВ АРМИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА.

На данном этапе исследований устанавливается оптимальная структура материала с предельной степенью армирования. Для этого проводятся исследования по следующей схеме. В определенное количество композиции (40 г) (которое остается постоянным на протяжении всего исследования) послойно вводится армирующий материал, затем компаунд формуется на станке центробежного формования СЦФ-1 в металлической форме, с размерами $D \times d \times l - 63 \times 55 \times 57$ мм. Состав композиции (УД-128, ПЭПА в пропорции 1:10) также остается постоянным. Наружный диаметр получаемого образца соответствует внутреннему диаметру формы, за исключением величины усадки материала, которая определяется известным методом (ГОСТ 18616-80). Формование производится при определенных технологических параметрах, которые остаются постоянными на данном этапе исследования, после чего полученные образцы материалов исследуются по известным методикам для определения физико-механических свойств, в частности разрывной прочности, анализ которой позволяет сделать выводы о качестве пропитки армирующего материала эпоксидной матрицей. По полученным данным определяется предельное эффективное содержание армирующего компонента в полимерном материале.

Материалы данного этапа исследований фиксируются в табличной форме, а также представляются в виде графических зависимостей для дальнейшего анализа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМОВАНИЯ ДЛЯ АРМИРУЮЩЕГО СЛОЯ.

Для определения оптимальных характеристик процесса центробежного формования для армирующего слоя выбирается на основе предыдущего этапа исследований оптимальное количество армирующего материала, которое остается постоянным на протяжении всего этапа и определенное количество эпоксидного связующего с условием, что их соотношение составляет предельную степень армирования материала. Это соотношение остается постоянным на протяжении всего этапа. Далее компаунд с тем же составом загружается в форму, как и в предыдущем этапе, но формуется при различных технологических параметрах, причем их изменение происходит по очереди.

Для уменьшения трудоемкости и числа требуемых опытов проводится анализ одного из параметров (например, температура), по результатам которого выбирается обоснованный диапазон или несколько значений, в которых будут изменяться остальные параметры. Составляется график испытаний, относительно которого происходит изготовление и исследование образцов. По полученным данным делается вывод о воздействии того или иного фактора на структуру и свойства полимерного материала.

Материалы данного исследования фиксируются в табличной форме, а также представляются в виде графических зависимостей для дальнейшего анализа.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ АНТИФРИКЦИОННОГО СЛОЯ, КОНТРОЛЬНЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММЫ.

На данном этапе исследований производится подбор оптимальной концентрации каждого из наполнителей в комплексе с точки зрения триботехнических свойств антифрикционного слоя. Для этого формуются образцы на основе выбранного на предыдущих этапах оптимального армирующего слоя и основы антифрикционного слоя, в которую вводятся наполнители, причем концентрация их варьируется по определенному план-графику, составляемому заранее. Получаемые образцы проходят структурные и триботехнические исследования, по результатам которых делается вывод о дальнейшем изменении концентрации того или иного наполнителя в большую или меньшую сторону.

После выявления оптимальной концентрации наполнителей проводится контрольный эксперимент полученного материала с целью исключить случайность полученного результата. Для этого при неизменных условиях формования изготавливается контрольная партия образцов, которые проходят прочностные, триботехнические и другие необходимые испытания. После подтверждения достоверности полученных экспериментальных данных выполняется построение обобщающей номограммы.

Для построения номограммы необходимо разделить информацию на приоритетную или главную (ту, которая будет отражена в номограмме) и вспомогательную (ту, которая представляется в виде технологических зависимостей, параметров, расчетов и т. д.). После этого определяется тип номограммы в зависимости от желаемого конечного результата, порядок представления информации (график, диаграмма и т. д.), логические зависимости в рамках номограммы и масштабы предоставления информации. На основании данного выбора и строится номограмма.

На рисунке 6 приведен пример такой номограммы. Диапазон номограммы поделен на четыре квадрата. В первом построена зависимость прочности АПК ($\sigma^{\text{раст}}$) от числа слоев армирующего материала (N), во втором квадрате – зависимость объемного содержания армирующего наполнителя в материале (ω_v) от его числа слоев (N). В третьем квадрате приведена зависимость толщины изделия (h) от объемного содержания армирующего наполнителя в материале (ω_v), в четвертом квадрате – зависимость массы композита (m), необходимого для изготовления изделия от толщины этого изделия (h). Данная номограмма

связывает прочностные, конструкционные параметры АПК и технологические параметры центробежного способа изготовления СПС.

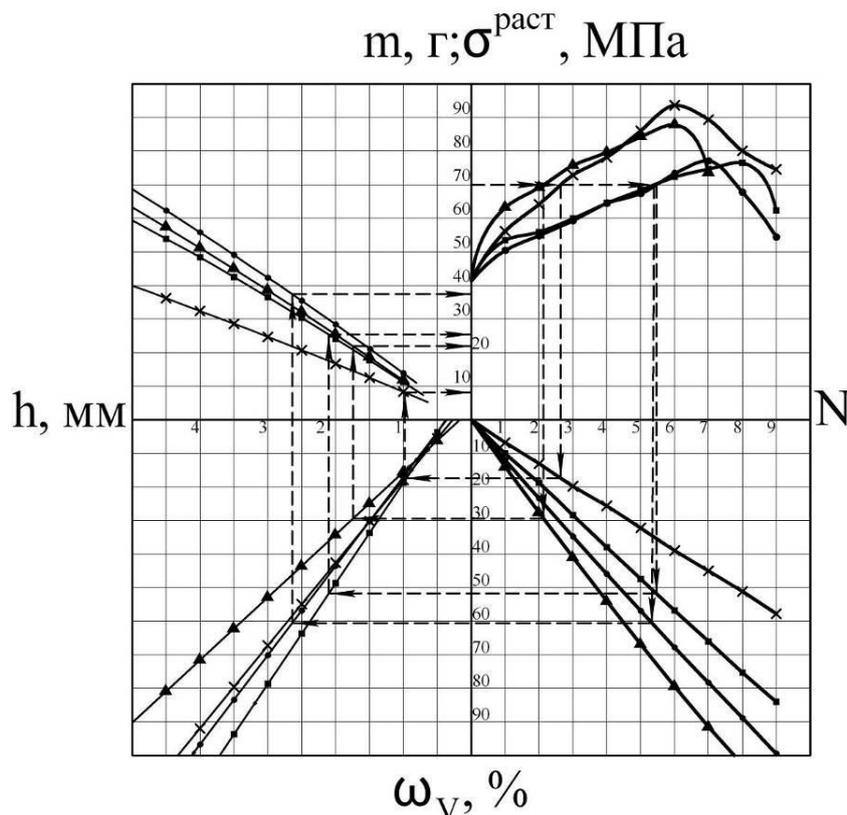


Рисунок 6 – Экспериментально-теоретическая номограмма для выбора и изготовления подшипников скольжения:

● – тик матрасный С38-БЮ, ■ – бязь ГОСТ 10183-93,
 × – стеклоткань ЛЭСБ ГОСТ 5937-81, ▲ – РУСАР® ТУ 2272-001-51605600-00

ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика позволяет связать различные исследования в один мощный комплекс, который дает подробную информацию не только о свойствах и структуре материалов, а также позволяет подобрать оптимальные условия для формирования данного материала. На основании этой методики разработано несколько способов изготовления подшипников скольжения, а также специализированная оснастка – на что поданы заявки на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захарычев С. П., Иванов В. А., Авдеев В. А., Гончаров С.В. Создание станка для разработки технологии центробежного литья изделий из полимерных композиционных материалов// ИВУЗ. “Вестник ТОГУ” 2007. № 1(4). ISSN 1996-3440 С. 36 – 41.
2. Козлов Г.В., Маламатов А.Х., Яновский Ю.Г. Структура и механические свойства полимерных композитов// Механика композиционных материалов и конструкций, 2006 г, т 12, №1, с. 64-112.
3. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник. - М.: Машиностроение, 1987. - 224 с.

Гончаров Сергей Владимирович

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
 Аспирант, инженер кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса»
 Тел. +79242064329
 E-mail: ya-84@list.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКАЗОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье на основе сочетания методов решения транспортной задачи и алгоритма муравьиных колоний предложена математическая модель распределения заказов, поступающих в конструкторском бюро (КБ) проектирования оснастки в процессе технологической подготовки производства (ТПП). Разработанная модель позволяет эффективно организовать деятельность подразделения с учётом особенностей труда конструкторов и необходимости учитывать связь работ.

Ключевые слова: управление заказами, транспортная задача, алгоритмы муравьиной колонии, технологическая подготовка.

The article considers mathematical model based on transportation problem and ant algorithms, that fulfils order distribution in tool set design constructor department used within production technological preparation process. Worked out model allows to organize its work considering constructors' labour peculiarities and demand to consider workflow connection.

Key words: order management, transportation problem, ant algorithms, technological preparation.

ВВЕДЕНИЕ

Объективной тенденцией развития общества является повышение доли интеллектуального труда, что в большинстве работ позиционируется как третья научно-техническая революция, революция в области управления и формирование «Общества знания» [1]. Формирование нового общества требует соответствующих ему изменений в структуре рынка информационных систем. Однако к настоящему времени уровень автоматизации для систем, поддерживающих управленческую деятельность, составляет 20%, в то время на уровне непосредственных исполнителей он составляет 60% [2]. Причинами этого являются творческий характер работы, требования к принятию нестандартных решений. Известно, что творческая деятельность в меньшей степени поддается нормированию, что вызывает проблемы с её формализованным описанием, автоматизированным планированием и контролем. Необходимость одновременного учёта большого числа переменных приводит к значительной размерности решаемых задач. Из приведённых показателей уровня автоматизации следует, что имеется значительный резерв роста уровня автоматизации управления и соответственно повышения эффективности функционирования предприятий. Развитие автоматизированных систем требует в качестве основы адекватного математического аппарата. Первоначально (с 70х гг.) основой систем автоматизированного управления производством и диспетчерских систем послужили методы теории расписаний, получившей развитие начиная с работ Конвея, Максвелла [3]. Объективные трудности при решении задач подобного класса (NP -полный случай) в теоретических исследованиях впоследствии привели к созданию квазиоптимальных методов решения задач такого рода (нейронные сети, метод отжига, генетические алгоритмы, алгоритм «муравьиных колоний» [4,5]).

Последние исследования разворачиваются по следующим направлениям: исследование NP -полных случаев на основе модификаций теорем и методов теории расписаний (Лазарев, Гафаров, 2001 [6]), сочетания различных методов (комбинирование алгоритмов путем направления выхода одного из них на вход другого – Прилуцкий [7], «принцип конструктора» – РАИ[8]). Однако в практику применения реальных управляющих систем данные методы входят с большим опозданием – преимущественно это системы имитации сигналов и т.д.

Исходя из выявленной необходимости создания информационных систем нового уровня и отмеченного расхождения между фундаментальными исследованиями и практической реализацией, ставится задача разработки математической модели, учитывающей особенности реализации функций управления в рамках конкретной предметной области. В рамках настоящей статьи это будет сделано на примере КБ предприятия авиационной промышленности, осуществляющих проектирование оснастки по заказам цехов основного производства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Процесс обеспечения оснасткой основных цехов состоит из следующих этапов. Цехи направляют в КБ частично формализованное требование на создание либо изменение оснастки, руководствуясь планами производства изделия, в меньшей степени – внезапно возникшими потребностями. Заказы поступают в отдел ТПП, где происходит назначение плановых сроков, распределение по КБ и далее по исполнителям. После завершения проектирования заказ направляется на инструментальный завод. Изготовленная оснастка апробируется и внедряется в цехе.

Согласно процессному подходу управление предполагает процессы планирования, организации, мотивации и контроля. Применительно к анализируемой предметной области это определение сроков выполнения работ, расчёт прогнозной загрузки заказами, распределение заданий между исполнителями, отслеживание текущего положения дел в подразделении и корректирующие действия. В соответствии с этим была построена базовая модель задачи, включающая блоки планирования, составления расписания, а также исполнения заказов и контроля над ним. Блок составления расписания, в свою очередь, включает два модуля: распределения работ и определения сроков. Блоки связаны с цветной сетью Петри, которая моделирует переход заказов из стадии в стадию с возможными возвратами, «стопорение» заказов вследствие непредвиденных обстоятельств (болезни сотрудника и др.), поступление дополнительных работ по ранее выполненным заказам, удаление заказов, утративших актуальность [9].

В рамках статьи будет более подробно рассмотрен модуль распределения работ (заказов) как наиболее важный для осуществления внутреннего управления в подразделении. На входе его имеются данные о заказах, как уже назначенных, так и вновь поступивших, и требованиях включить их в работу данного периода (выход блока планирования), а также информация о конструкторах, подразделяемая на условно-постоянную (квалификация, специализация) и текущую (присутствие на рабочем месте, недавно выполненные работы).

МОДИФИКАЦИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МОДЕЛИ

Модуль распределения работ начинает функционирование после срабатывания перехода сети Петри «Принято решение о выполнении заказа». Заказы поступают небольшими группами, при этом для каждой из них точными методами (размерность задачи приемлема) может быть найден оптимум распределения. Анализируемая задача близка хорошо исследованной задаче о назначениях, однако имеются отличия. При решении задачи о назначениях каждая работа относится одному исполнителю и каждый исполнитель выполняет одну работу. Для рассматриваемого случая распределение работ может происходить в виде $1-k$ (у каждого исполнителя несколько заказов) либо даже $l-k$ (у каждого исполнителя несколько заказов, каждый заказ может быть назначен нескольким исполнителям). В связи с этим предлагается отталкиваться от формулировки близкой задаче о назначениях транспортной задачи. Её особенностью в классе распределительных задач является тождество единиц измерения работ и ресурсов. Используем фонд рабочего времени конструкторов (ресурсов) и трудоёмкость заказов (работ), что и позволяет привести измерение к единым величинам – часам.

Однако специфика предметной области такова, что для успешного функционирования подразделения необходимо учитывать связь вновь поступивших заказов с уже

распределёнными, что требует обработки больших объёмов данных и значительно усложняет задачу. Для решения данной проблемы предложена следующая методика, сочетающая точные методы и элементы алгоритма «муравьиной колонии».

Обратимся к исходной постановке транспортной задачи. Обозначим заказы в качестве «поставщиков» трудоёмкости $A = a_1, a_2 \dots a_i \dots a_m$, где $i = 1, 2 \dots m$, конструкторов в качестве «потребителей» $B = b_1, b_2 \dots b_j \dots b_n$, где $j = 1, 2 \dots n$, стоимости перехода заказа к конструктору \tilde{N}_{ij} . Трудоёмкость a_i каждого планируемого заказа находится по формуле (1):

$$a_i = K * M_T, \tag{1}$$

где $K = 0 \dots 1$ – коэффициент включения заказа в плановые работы периода;

M_T – оцениваемая по требованиям к оснастке длительность выполнения заказа, час.

Коэффициент включения в работы периода является выходом блока планирования, в рамках которого строится прогнозный график ТПП [9].

$K=1$ для максимального элемента итоговой матрицы блока планирования.

Для определения трудоёмкости заказов M_T используются следующие данные, сведённые в таблицу 1.

Таблица 1 – Матрицы определения трудоёмкости заказа

Код	Смысл			Нормировка
	строка	столбцов	элементов	
$E^T = \ e_{ij}\ $, матрица «Заказ» – «Оснастка»	i^e – номер заказа	j^e – код оснастки	вероятность наличия данного типа оснастки в заказе	$\forall i: \sum_j e_{ij} = 1$
$V = \ v_{ij}\ $, матрица «Оснастка» – «Трудоёмкость»	i^v – код оснастки	j^v – код нормированных значений трудоёмкости	вероятность проектирования в течение определенного времени	$\forall i: \sum_j v_{ij} = 1$
$M_{\partial n} = \ m_{i1}\ $ - столбец нормированных значений трудоёмкости			Принятый ряд планирования трудоёмкости, в часах (2, 4, 6, 12, 16, 40...)	
$S = \ s_{ij}\ $, матрица «Заказ» – «Стадия»	i^s – номер заказа	j^s – номер этапа выполнения	Прирост готовности заказа на стадии выполнения	$\forall i: \sum_j s_{ij} = 1$

На основании данных таблицы 1 рассчитываются математические ожидания трудоёмкости заказов по формуле (2):

$$M_T = E^T * V * M_{Tn} \tag{2}$$

по формуле (3) – распределение времени по стадиям работ.

$$ST = M_T * S = E^T * V * M_{Tn} * S \tag{3}$$

Фонд времени b_j , которым располагает конструктор, определяется по формуле (4)

$$b_j = \left(F + s_h - \sum_k (M_{T_k} (1 - \alpha_k)) \right) * (1 - \beta), \tag{4}$$

где F – фонд времени с учётом рабочих и праздничных дней, плановых отпусков и заложенного процента на внеплановые неявки;

s_h – лимитируемое время сверхурочных работ;

α_n – процент готовности (с учётом времени на согласование и утверждение) ранее назначенных заказов трудоёмкости M_{Tk} ;

β – доля времени, затрачиваемая конструктором на дополнительные работы (работу со службами предприятия, ответы на запросы по телефону и т.д.).

Далее рассмотрим коэффициенты целевой функции C_{ij} . В качестве стоимости перехода заказа к конструктору C_{ij} берутся величины, обратные совокупной способности успешно выполнить работу. Способность успешно выполнить работу оценивается итоговой матрицей I «Исполнитель» - «Заказ», которая является взвешенной суммой матриц, отражающих предпочтения в распределении работ по различным параметрам и определяется по формуле (5):

$$I = \sum_j \gamma_j * I_j \quad (5)$$

где γ_j – весовые коэффициенты значимости характеристик в долях единицы;

I_j – матрицы, каждая из которых представляет собой произведение матриц «заказ-характеристика» и «характеристика – конструктор».

Склонность конструктора к выполнению заказа оценивается по следующим критериям: общая специализация (доля заказов заданного типа в опыте работника), квалификация (вероятность успешного выполнения работы при имеющейся категории), применяемый инструмент проектирования (кульман, САПР), показатель наличия сходных заказов в предшествующие периоды. Если оцениваемая способность равна 0 хотя бы по одному из частных показателей, в качестве C_{ij} принимается M (назначение недопустимо).

Для учёта опыта по ранее выполненным работам вследствие того, что количество заказов велико, используются методы для NP -полных задач. Проведём аналогии между характеристиками предметной области и параметрами, известными по методу «муравьиных колоний» [3]. Результаты сопоставления сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Аналогии понятий реализуемого алгоритма алгоритму «муравьиных колоний»

Термин, применяемый в алгоритме «муравьиных колоний»	Аналог в данной системе	Обозначение
Муравей	Заказ	l
Ребро графа	Конструктор	t
След фермента (феромона)	Память конструктора о ранее выполненных заказах (опыт)	$\tau^l(t)$
Путь, пройденный муравьём между точками графа	Мера различия заказа с полученными ранее	$N^l(t)$
Испарение феромона	Забывание присущих заказу особенностей	$\tau(t)^{new} = \tau(t)(1 - \rho)$

Уравнение (6) показывает количество фермента, который был оставлен на каждой грани пути для муравья l [3]. В рассматриваемой задаче $\Delta \tau^l(t)$ соответствует изменению опыта конструктора при выполнении работы.

$$\Delta \tau^l(t) = \frac{Q}{N^l(t)} \quad (6)$$

где Q – константа;

$N^l(t)$ – сводная характеристика различия заказов, определяемая по ряду параметров: число отличающихся цифр в обозначении детали, группы оснастки, группе специализации цехов.

Результат формулы (6) в алгоритме «муравьиной колонии» является средством измерения пути: короткий путь характеризуется более высокой концентрацией фермента, длинный – более низкой. Здесь же – более близкие к текущему заказы оставляют более сильный след в сознании конструктора, нежели не связанные с текущим. Близкие «запахи» складываются по формуле (7), в результате чего получают новые значения $\tau^l(t)'$:

$$\tau^l(t)' = \Delta\tau(t) + \tau^l(t) \quad (7)$$

К наиболее удалённым во времени заказам применяется процедура испарения фермента. Получаем уравнение (8):

$$\tau^l(t)^{new'} = \tau^l(t)'(1-\rho) \quad (8)$$

где $\tau^l(t)^{new'}$ – новое значение параметра, характеризующего память о заказе данного типа;
 ρ – параметр, принимающий значения в интервале 0...1.

Таким образом, при каждом назначении заказа массив «запахов» дополняется (7), а с некоторой периодичностью происходит уменьшение величины всех запахов (8). Величины $\tau^l(t)'$ формируют переменную матрицу I_j , по строению аналогичную упомянутым ранее матрицам специализации и др.

После определения всех матриц I_j , ищется минимум целевой функции (9):

$$q = \sum \tilde{N}_{ij} * x_{ij} \quad (9)$$

где q – критерий качества распределения,

x_{ij} – трудоёмкость заказа в часах, назначенная для выполнения конструктору.

По результатам распределения заказов формируются матрицы, указанные в таблице 3.

Таблица 3 – Выход блока распределения работ

Код	Смысл			Нормировка
	строк	столбцов	элементов	
$R = \ r_{ij}\ $, матрица отнесения к рабочему месту «Заказ» – «Исполнитель»	i^r – номер заказа	j^r – код конструктора	Доля конструктора в выполнении заказа	$\forall i: \sum_j r_{ij} = 1$
$L = \ l_{ij}\ $, матрица параллельности работ «Заказ» – «Исполнитель»	i^l – номер заказа	j^l – код конструктора	Доля времени, затраченная на заказ в данном периоде	$\forall j: \sum_i l_{ij} = 1$

Элементы матрицы R образуются при делении значений x_{ij} в часах на фонд времени работы конструктора, матрицы L – на трудоёмкость заказа.

По формуле (10) рассчитывается нагрузка на сотрудников:

$$LT = M_T * L = E^T * V * M_{Tn} * L \quad (10)$$

При необходимости может быть принято управленческое решение о её корректировке – частичном перераспределении заказов руководителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная математическая модель представляет собой гибкий комплекс, позволяющий эффективно распределять работы, корректировать это распределение в случае необходимости, предоставлять информацию для принятия управленческих решений.

Модель позволяет обеспечить следующие преимущества:

- адекватно описывать состояние и учитывать неопределенность функционирования предметной области;
- проводить расчёты с малым количеством данных, то есть приводить к приемлемому уровню размерности задачи с целью применения точных методов;
- учитывать связь работ без предварительной кластеризации за счёт использования показателя недавно выполненных работ;
- учитывать психологические особенности труда конструкторов (опыт, настройку на работу);
- быстро формировать отчёты о выполнении работ с помощью матриц R, L, S, LI.

Описанная модель реализована в виде информационной системы, позволяющей обслуживать потребности руководителей низшего уровня.

В результате функционирования модуля распределения работ:

- сокращается суммарная трудоёмкость выполняемых работ за счёт повышения коэффициента наследования работ;
- более равномерно планируется загрузка и соответственно повышается ритмичность и качество работ.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет адекватно распределять и учитывать работы, эффективно поддерживая деятельность подразделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Питер Дракер. «Общество знания» [электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.drucker.ru>, свободный
2. Карминский А. М., Черников Б. В., Информационные системы в экономике: в 2-х ч. - М.: Финансы и статистика, 2006
3. Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. – Теория расписаний. - М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 360 с.
4. Rudolph, G.. "Convergence analysis of canonical genetic algorithms" // IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 5 N 1. 1994. - pp. 96-101
5. Balas E., Niehaus W. Optimized crossover-based genetic algorithms for the maximum cardinality and maximum weight clique problems. J. Heuristics. – v4 (1998), N4. – pp. 107–122
6. А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров Теория расписаний. Минимизация суммарного запаздывания для одного прибора. – Научное издание. – Вычислительный центр им. А. А. Дородницына, 2006. – 150 с.
7. М. Х. Прилуцкий, В. С. Власов Метод комбинирования эвристических алгоритмов для конвейерных задач теории расписаний / Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2007. – 086. – с. 901-905
8. Вишневский К. П., Чижиков В. И. Вероятностный полиномиальный алгоритм для решения NP-полных задач. – Труды ФОРА, 2007. – № 12. – с. 31-37
9. Ефимова П. Е. Система управления потоками работ в конструкторском бюро проектирования оснастки. – Образование и наука в региональном развитии. – Материалы научно-практической конференции. Часть 1. – Тутаев, 2008. – с. 141-149

Комаров Валерий Михайлович

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьёва, г. Рыбинск
Кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой «Вычислительные системы», научный руководитель
Телефон: (4855) 21-97-16, Факс: (4855) 21-39-64
E-mail: vs@rgata.ru

Ефимова Полина Евгеньевна

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьёва, г. Рыбинск
Аспирант кафедры «Вычислительные системы»
Телефон: (4855) 28-09-64, Факс: (4855) 21-39-64
E-mail: poline_e@pisem.net

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПЭВМ-УЧПУ ДЛЯ САМООБУЧАЮЩЕЙСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается вопрос разработки контроллера сопряжения ПЭВМ-УЧПУ для построения самообучающейся технологической системы. Сформулированы требования, которыми должен обладать контроллер, предложена его структурная схема и описан принцип его работы.

Ключевые слова: *Контроллер сопряжения, самообучающаяся технологическая система, управление технологическим оборудованием с УЧПУ.*

The question of working out of the controller of interface PC-CNC for construction of self-trained technological system is considered. Requirements which the controller should possess are formulated, its block diagramme is offered and the principle of its work is described.

Key words: *The interface controller, self-trained technological system, management of the process equipment with CNC.*

Как показывает анализ справочной и научной литературы, не для всех обрабатываемых материалов и условий обработки имеются зависимости, предсказывающие параметры качества поверхностного слоя (ПКПС) обработанной поверхности после механической обработки. При обработке новых материалов, новыми инструментальными материалами, при внедрении новых технологических процессов справочные данные по ним могут или вовсе отсутствовать, или быть не адекватны реальным условиям. На лицо имеется неопределенность в обеспечении заданных ПКПС обработанных поверхностей между имеющейся начальной информацией об объекте управления, которым является процессе резания (начальная информация – геометрия инструмента, материал инструмента и заготовки, характеристики оборудования и т.д.), и требуемым качеством обработанной поверхности. Для устранения начальной неопределенности используют обучение или самообучение системы в процессе управления и в использовании накапливаемой информации [1].

Для получения математических моделей связывающих условия обработки и ПКПС обработанной поверхности непосредственно на рабочем месте предложен метод самообучения с использованием технологической системы (ТС) с УЧПУ и ПЭВМ, которая предназначена для определения математической модели, хранения и управления [2]. Суть метода самообучения ТС заключается в планировании активного эксперимента непосредственно на рабочем месте, получении и обработке результатов эксперимента, получении математической модели, связывающей условия обработки и ПКПС обработанной поверхности и использовании полученной модели для обеспечения заданных ПКПС деталей машин.

В состав самообучающейся технологической системы (рисунок 1) входят следующие основные элементы: технологическая система (ТС); датчик, измеряющий тангенциальную составляющую силы резания (Д Pz), датчик, измеряющий текущую температуру в зоне резания (Д T); датчик, измеряющий параметр шероховатости Ra (Д Ra); контроллер сопряжения (КС) датчиков (Д Pz) и (Д T) с ПЭВМ и ПЭВМ с УЧПУ; устройство числового программного управления (УЧПУ) типа NC200 (класс PCNC), обеспечивающее управление ТС за счет изменения подачи S, скорости резания V.

В большинстве случаев УЧПУ технологическим оборудованием предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для того, чтобы построить САТС на базе технологического оборудования с УЧПУ, которая должна вычислять математическую модель, вести базу данных и анализировать ситуацию во время обработки в ее составе необходимо использовать ПЭВМ с соответствующим алгоритмом работы. Управляющие воздействия на исполнительные механизмы станка формирует УЧПУ в

соответствии с поступающим заданием от ПЭВМ. Одним из основных элементов САТС является КС. Он предназначен для организации обмена информацией между датчиками и ПЭВМ и ПЭВМ с УЧПУ. Вычисленная величина поправки (подача, скорость резания и глубина резания) передается от ПЭВМ контроллеру сопряжения и далее в УЧПУ.

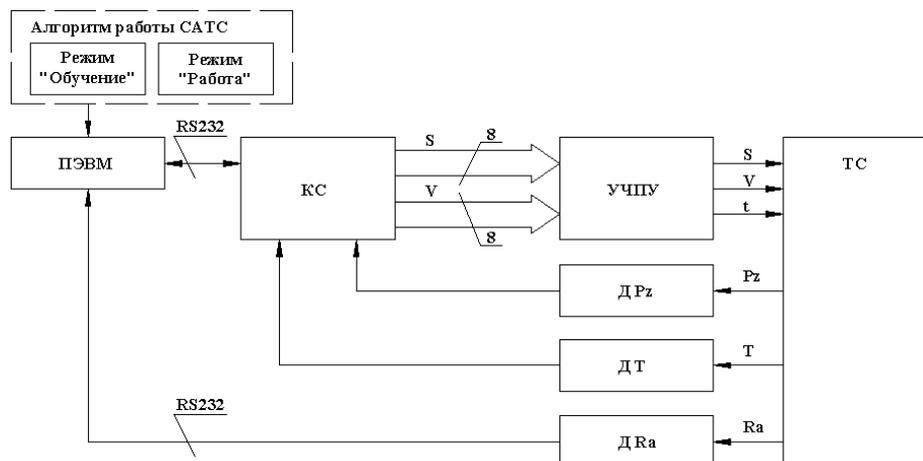


Рисунок 1 - Структурная схема самообучающейся технологической системы

В большинстве случаев УЧПУ технологическим оборудованием предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для того, чтобы построить САТС на базе технологического оборудования с УЧПУ, которая должна вычислять математическую модель, вести базу данных и анализировать ситуацию во время обработки в ее составе необходимо использовать ПЭВМ с соответствующим алгоритмом работы. Управляющие воздействия на исполнительные механизмы станка формирует УЧПУ в соответствии с поступающим заданием от ПЭВМ. Одним из основных элементов САТС является КС. Он предназначен для организации обмена информацией между датчиками и ПЭВМ и ПЭВМ с УЧПУ. Вычисленная величина поправки (подача, скорость резания и глубина резания) передается от ПЭВМ контроллеру сопряжения и далее в УЧПУ.

Для организации обмена информацией между датчиками (Д Рz) и (Д Т) и ПЭВМ необходимо учитывать, то, что от датчиков информация поступает в аналоговом виде, а в ПЭВМ необходимо вводить информацию в цифровом виде через имеющиеся стандартные порты ввода-вывода (COM, LPT, USB). Поэтому в состав контроллера должны входить элементы, преобразующие аналоговый сигнал, поступающий с датчиков, в цифровой вид и передающие его в ПЭВМ через стандартные порты ввода-вывода. Связь контроллера с ПЭВМ осуществляется через стандартный последовательный COM-порт, реализующий интерфейс связи RS-232.

Наличие модуля ввода-вывода дискретных сигналов, а также возможности программируемой логики станка (PLC) позволяет настроить УЧПУ NC200 таким образом, что можно изменять условия обработки в автоматическом режиме работы УЧПУ за счет внешнего программного управления. Подача и частота вращения шпинделя могут изменяться в диапазоне от 0 до 127% от первоначально установленных значений (первоначально установленным значениям соответствует 100%) с дискретностью 1%. Поэтому связь УЧПУ с внешним оборудованием, в том числе и управляющей ПЭВМ, осуществляется через модуль дискретного ввода-вывода сигналов. Для обмена информацией между ПЭВМ и УЧПУ в КС необходимо предусмотреть преобразование последовательного цифрового кода, поступающего от ПЭВМ по COM-порту, в параллельный код соответствующего уровня напряжения (входное напряжение логического нуля - от 0 до 7 В; входное напряжение логической единицы – от 15 до 30 В).

Исходя из выше сказанного, следует, что для реализации связи и обмена информацией между ПЭВМ и УЧПУ, а также для управления процессом механической обработки от ПЭВМ необходимо использовать КС (рисунок 2), который обеспечивал бы следующее:

- прием аналоговой информации от первичных преобразователей, установленных на технологическом оборудовании, и преобразование в цифровой вид для передачи в ПЭВМ;
- передачу информации от первичных преобразователей в ПЭВМ;
- прием управляющей информации от ПЭВМ и передача ее в УЧПУ;
- связь между ПЭВМ и КС должна осуществляться по каналу RS-232;
- связь между КС и УЧПУ через модуль дискретного ввода-вывода сигналов.

Таким образом, на основе сформулированных требований, которыми должен обладать КС, была разработана структурная схема КС (рисунок 2,а) и выполнена реализация КС (рисунок 2, б).

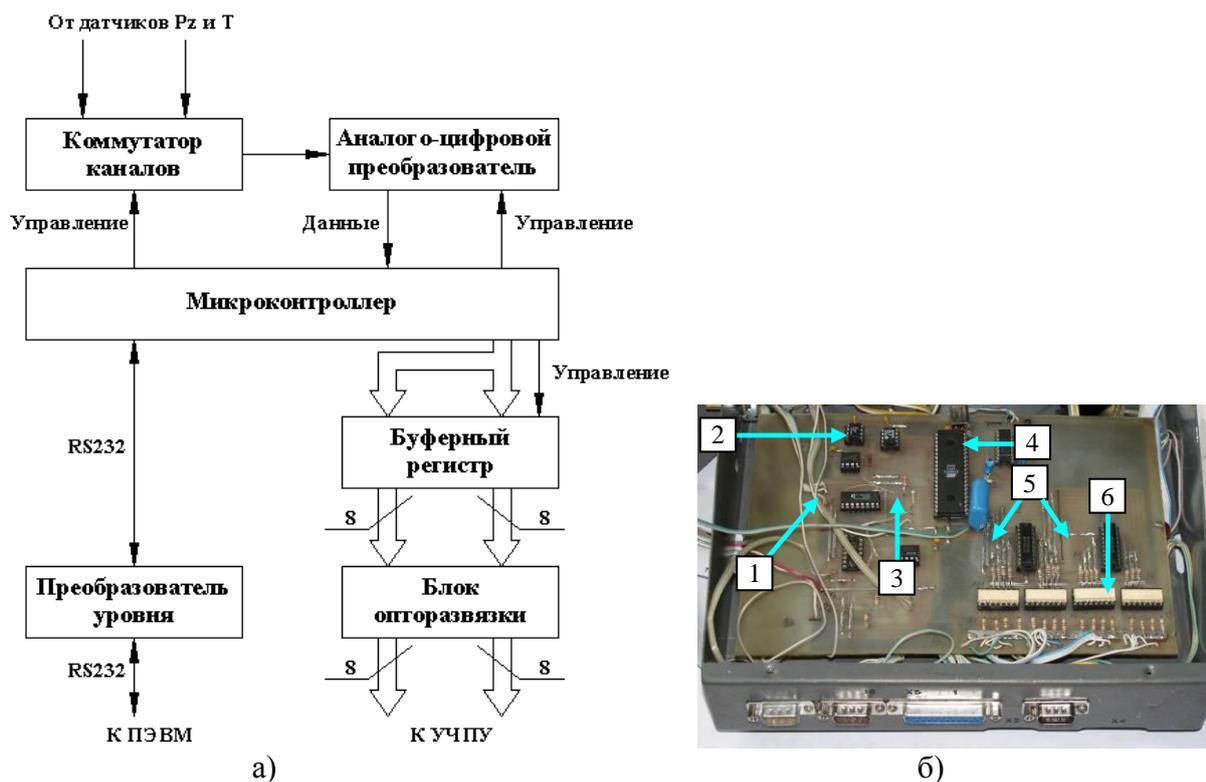


Рисунок 2 – Контроллер сопряжения

а)структурная схема контроллера сопряжения; б)внешний вид реализованного КС:

1 – коммутатор каналов; 2 – АЦП; 3 – микроконтроллер;

4 – преобразователь уровня MAX232CPE;

5 – буферные регистры; 6 – блок опторазвязки

Основой КС является микроконтроллер семейства x51 модели AT89C51-24PI. Он управляет процессом получения информации от первичных преобразователей, передачей этой информации в ПЭВМ и выдачей управляющего воздействия от ПЭВМ в УЧПУ.

Во входной части КС имеются коммутатор каналов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Коммутатор каналов управляется микроконтроллером, и предназначен для поочередного подключения датчиков силы и температуры ко входу АЦП. В КС используется один 12 разрядный АЦП последовательного принципа действия модели AD7895AN-3.

Выходная информация от КС к УЧПУ передается через буферный регистр и блок опторазвязки. Буферный регистр предназначен для хранения выводимой информации в УЧПУ. В состав буферного регистра входит два регистра разрядностью 8 бит. Блок опторазвязки реализован на диодно-транзисторной оптопаре типа TLP521-4. Блок опторазвязки предназначен для гальванической развязки цепей КС и модуля дискретного ввода-вывода сигналов УЧПУ, т.к. выходное напряжение КС соответствует уровню ТТЛ, а

дискретные входы УЧПУ требуют для управления напряжение 0-7 В - уровень логического нуля и 24 В - уровень логической единицы.

Для согласования уровней напряжения последовательного канала RS-232 между ПЭВМ и КС используется преобразователь уровня MAX232СРЕ.

КС предназначен для работы с УЧПУ типа NC200, NC201, NC201M, NC220, NC210, NC110. КС подключается к УЧПУ через внешний входной разъем IN или через внешний модуль ввода дискретных сигналов.

КС подчиняется командам, поступающим от ПЭВМ, которыми можно разрешить или запретить чтение информации поступающей от датчиков. При работе САТС в режимах «Обучение» и «Работа» необходимо постоянно получать информацию от датчиков из зоны резания. Поэтому при выборе этих режимов работы САТС необходимо дать команду КС на запуск и чтение информации от АЦП. Необходимость в управлении ТС определяется заложенным алгоритмом в ПЭВМ и информацией полученной из зоны резания. В случае необходимости управления ТС ПЭВМ отправляет соответствующую информацию в КС. На основе принятой информации КС определяет, какой параметр (S или V) необходимо изменить и выдает команду УЧПУ через буферный регистр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпкин, Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
2. Суслов, А.Г. Самообучающиеся автоматизированные технологические системы, обеспечивающие требуемое качество обрабатываемых поверхностей деталей // А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин, Д.Н. Финатов. Справочник. Инженерный журнал. -2004. - № 1. - С. 14-17.

Петрешин Дмитрий Иванович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизированные технологические системы»

241035, г. Брянск, бульвар 50-ия Октября, д. 7

Тел. (4832) 58-82-85

Факс(4832) 56-14-75

E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИЗМАХ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье приведены результаты разработки системы компьютерного моделирования динамики механизмов кузнечно-штамповочного оборудования, рассмотрены вопросы применения методов компонентного моделирования и объектно-ориентированных технологий при автоматизированном построении динамических моделей и их программной реализации. Возможности системы демонстрируются на примере механизма отрезки холодноштамповочного четырёхпозиционного автомата АВ1918.

Ключевые слова: механизм, моделирование, объект, динамическая модель, нагрузка, возмущение, отклик, жёсткость, масса, момент инерции, коэффициент демпфирования, конструкционная нагрузка, технологическая нагрузка, внешняя нагрузка, функция положения, зазор.

The paper considers the development of the results of computer simulation of the dynamics of mechanisms of press-forging equipment, the application of methods of component modeling and object-oriented technologies for automated construction of dynamic models and their software implementation. The cutting mechanism of the cold die forging of four-position automaton AB1918 is considered as an example of the capability of the system demonstrated.

Key words: mechanism, modeling, object, dynamic model, load, disturbance, response, rigidity, mass, moment of inertia, damping coefficient, structural load, technological load, external load, the function of position, clearance.

Динамические (колебательные) процессы, их уровень и характер, являются одним из основных факторов, определяющих работоспособность, надёжность, производительность и, в конечном итоге, качество любой механической системы. Возможность оценки параметров динамических процессов, протекающих в механизме, и их учёта при его проектировании, – залог создания действительно высококачественных, конкурентоспособных изделий.

Методика расчёта динамических процессов, протекающих в механизме, широко известна [1 – 3]. Её суть – подмена реального механизма системой сосредоточенных масс, соединённых безынерционными, упруго-диссипативными связями (динамической моделью), движение которой описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка, решаемой, в общем случае, численно. Однако, не смотря на постоянное совершенствование [3], связанное с увеличением числа масс (сложности) моделей, учётом зазоров в кинематических связях, уточнением характеристик упругих связей, параметров диссипации, сил трения, внешних нагрузок, широкого распространения на практике эта методика не получила. Основные причины этого следующие:

- низкая степень точности и большая трудоёмкость расчёта параметров модели, в первую очередь, упруго-инерционных характеристик;
- большая трудоёмкость работ, связанных с разработкой динамической модели конкретного механизма, её математического описания и программной реализации;
- невозможность оценки достоверности полученных результатов без проведения экспериментальных исследований уже готового механизма.

Система компьютерного моделирования динамических процессов в механизмах разработана с целью снижения трудоёмкости динамических исследований механизмов и повышение их достоверности. В её основе лежат методы твёрдотельного моделирования [3, 4], методы компонентного моделирования и объектно-ориентированных технологий.

Любой механизм можно рассматривать как совокупность некоторых элементов, соединённых между собой различного рода связями. Посредством этих связей элементы механизма взаимодействуют друг с другом, обеспечивая, таким образом, его

функционирование. Термином элемент будем обозначать отдельно взятую деталь механизма, какой-то её фрагмент или, наоборот, сразу несколько деталей. Такое определение элемента соответствует понятию объект, – одному из базовых в теории компонентного моделирования сложных динамических систем и объектно-ориентированных технологий [2 – 4].

С объектно-ориентированными технологиями в моделировании связан ряд основополагающих характеристик:

- Объект – некоторая совокупность данных. Данные – это свойства, методы и события на которые объект может реагировать. Методы – способы общения с данными объекта. Возможность чтения и изменения данных. Свойства и методы по существу определяют устройство объекта. Его способность реагировать определённым образом на конкретно определённые возмущения – события.

- Инкапсуляция – сокрытие информации. Объект скрывает детали своей работы.

- Наследование. Новый объект можно определить на основе уже существующих. При этом кроме каких-то новых свойств, методов и событий он будет содержать (наследовать) свойства, методы и события объектов, на основе которых он создан.

- Полиморфизм. Одни и те же свойства могут быть присущи совершенно разным объектам. Большинство объектно-ориентированных систем представляют полиморфизм через наследование.

Сопоставим каждый элемент какого-либо механизма, например, механизма отрезки четырёхпозиционного холодноштамповочного автомата (ХША) АВ1918 (рисунок 1), с объектом, согласно данному выше определению. Любые процессы в таком объекте, могут моделироваться каким угодно образом и, в соответствии с принципами инкапсуляции и полиморфизма, на данном этапе, их природа и описание, математическое, программное или физическое, не рассматривается.

Такой подход представляет интерес, как при решении задач, связанных с разработкой динамических и математических моделей механизмов [3, 4], так и, что особенно существенно, их программных реализацией при дальнейшей компьютерной обработке [3].

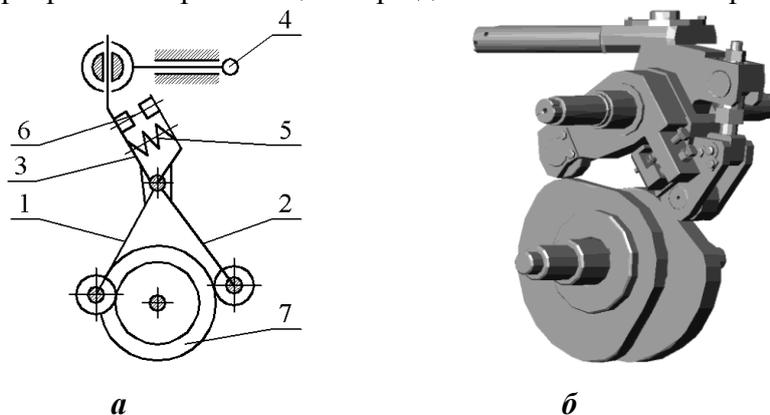


Рисунок 1 – Механизм отрезки холодноштамповочного автомата АВ 1918

а – кинематическая схема, б – твёрдотельная модель

1 – рычаг прямого хода; 2 – рычаг обратного хода; 3 – рычаг;

4 – исполнительное звено (ножевой шток);

5 – пружина; 6 – регулируемый зазор; 7 – блок кулаков привода рычагов прямого и обратного хода;

Представим реальный механизм в виде соединённых между собой передаточными функциями объектов. В качестве таких объектов могут выступать, как отдельные звенья, так и совокупности звеньев, образующих простейшие механизмы. С каждым объектом свяжем пять наборов характеристик:

1. Свойства, в том числе массы, моменты инерции, жесткости, коэффициенты диссипации, параметры передаточных функций и другие, определяющие объект как замкнутую систему.

2. Отклики на возмущения со стороны других объектов.

3. Силовые возмущения со стороны других объектов.
4. Входные параметры, среди которых могут быть кинематические и силовые.
5. Выходные параметры (кинематические, силовые и значения критериев оценки различного рода процессов, протекающих в объекте).

Свойства и отклики (пункты 1 и 2), – это величины, целиком зависящие от объекта. Причём первые постоянные, не зависящие от внешних условий, вторые – зависимые от той среды, в которую помещен объект. Силовые возмущения и входные параметры (пункты 3 и 4) – окружающая объект среда. Выходные параметры (пункт 5), – это набор результирующих данных, позволяющих оценить процессы, протекающие в объекте, после размещения его в конкретной среде. Следует особо отметить, что набор объектов, представляющих механизм (объектное представление) и сам механизм полностью адекватны друг другу. Подмена реальности моделью осуществляется только на уровне объекта. То есть точность результатов динамических исследований определяется исключительно “доброкачественностью” тех объектов, которые в этих исследованиях используются.

Ещё одно уточнение, объект и модель объекта, как следует из выше изложенного, понятия различные. Однако, при изложении дальнейшего материала, термином объект будем обозначать его модель.

Объект, моделирующий механическую систему, которая приводится в движение через одно единственное входное звено и имеющее только одно выходное звено, изображён на рисунке 2. Ему может соответствовать одна какая-либо деталь (или даже её фрагмент) достаточно сложного механизма, например, нижнее плечо рычага прямого хода механизма отрезки ХША АВ1818 (рисунок 1а, поз 1). Входной параметр в данном случае – угол поворота кулачка φ_0 , выходной – угол поворота рычага φ_1 . В тоже время, это может быть и более сложная механическая система, – кулачковый механизм (поз. 7, 1, 2, 5, 6), или, даже, весь механизм целиком (детали, обозначенные на рис. 1а позициями с 1 по 7).

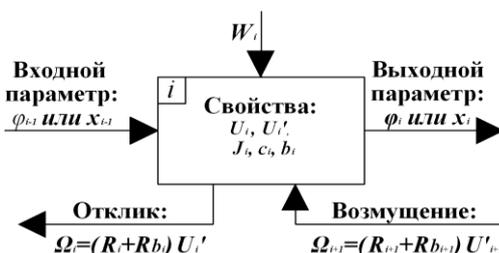


Рисунок 2 – Объект, моделирующий механическую систему с одним входным и одним выходным звеньями

Входными параметрами объекта являются функция перемещения (углового или линейного) предшествующего ему объекта (φ_{i-1}) и внешние нагрузки W_i на этот объект (например, силы и моменты сил трения, конструкционные и технологические). Выходной параметр, соответственно, – функция перемещения выходного звена. Свойства – набор констант, определяющих количественные характеристики модели, соответствующей данному объекту. Среди них, параметры функций положения и передаточных функций (для входного звена это U_i и U_i'), упруго-инерционные и диссипативные характеристики. Отклик, по существу выходной параметр, – воздействие сил упругости R_i и диссипации R_{b_i} в первом фрагменте входного звена, на объект предшествующий. Возмущение – это отклик со стороны следующего объекта (или следующих, если их несколько) на воздействие объекта данного.

Конкретным примером объекта представленного на рисунке 2 является, в частности, объект, именуемый в дальнейшем рычаг или качающийся рычаг (рисунок 3), движение которого описывается n -массовой динамической моделью и, соответственно системой n -нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Компьютерной (программной) реализацией этого объекта будет итерационная схема решения системы уравнений, построенная с помощью одного из многочисленных методов их численного интегрирования.

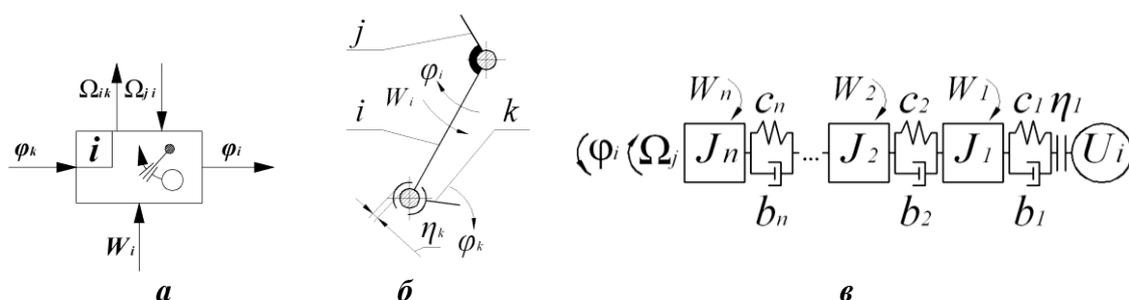


Рисунок 3 – Объект – вращающийся рычаг
 а – обозначение на объектном представлении механизма (*i*-ый объект),
 б – кинематическая схема, в – динамическая модель

Математическая модель объекта (рисунок 3):

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = -c_1(\varphi_1 - U_i(\varphi_k)) - b_1(\dot{\varphi}_1 - U'_i(\varphi_k)\dot{\varphi}_k) + c_2(\varphi_2 - \varphi_1) + b_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + W_1 \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = -c_2(\varphi_2 - \varphi_1) - b_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + c_3(\varphi_3 - \varphi_2) + b_3(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + W_2 \\ \dots \dots \dots \\ J_n \ddot{\varphi}_n = -c_n(\varphi_n - \varphi_{n-1}) - b_n(\dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_{n-1}) + W_n + \Omega_j \end{cases}, \quad (1)$$

где n – число сосредоточенных масс ($n = 1, 2, \dots, 5$), моделирующих рассматриваемый объект (вращающийся рычаг).

Очевидно, чем больше n , тем точнее модель будет описывать объект, естественно, в случае достоверности значений её прочих параметров.

Таким образом, если в качестве математической модели вращающегося рычага использовать уравнения (1), будем иметь:

▪ Входные параметры:

$\varphi_k, \dot{\varphi}_k$ – перемещение и скорость предшествующего ему k -го объекта;

Ω_j – возмущение со стороны j -го объекта, следующего за рассматриваемым;

W_m – внешние нагрузки ($m = [1, 2, \dots, n]$). Это момент, приложенный к m -ой массе модели (или сосредоточенная сила умноженная на плечо)

▪ Выходные параметры:

$\varphi_i, \dot{\varphi}_i$ – перемещение и скорость объекта;

Ω_i – отклик на возмущение предшествующего объекта, равный:

$$\Omega_i = [c_1(\varphi_1 - U_i(\varphi_k)) + b_1(\dot{\varphi}_1 - U'_i(\varphi_k)\dot{\varphi}_k)] \cdot U'_i(\varphi_k); \quad (2)$$

$\delta, \delta_{\max}, \sigma$ – точность позиционирования рычага, её максимальное и среднее значение:

$$\delta = \varphi_n - U_i(\varphi_k), \quad \delta_{\max} = \max(\varphi_n - U_i(\varphi_k)), \quad \sigma = \frac{1}{T} \int_0^T |\varphi_n - U_i(\varphi_k(t))| dt. \quad (3)$$

Характеристики вида (3) служат для оценки уровня протекающих в объекте динамических процессов.

▪ Свойства:

n – число масс динамической модели (рисунок 1в);

J_m – моменты инерции фрагментов рычага относительно осей их вращения ($J_m = const$);

c_m, ψ – упруго-инерционные характеристики связей, соединяющих фрагменты рычага ($c_m = const$ при $m \neq 1$);

η_i – зазор в соединении рассматриваемого объекта с предыдущим;

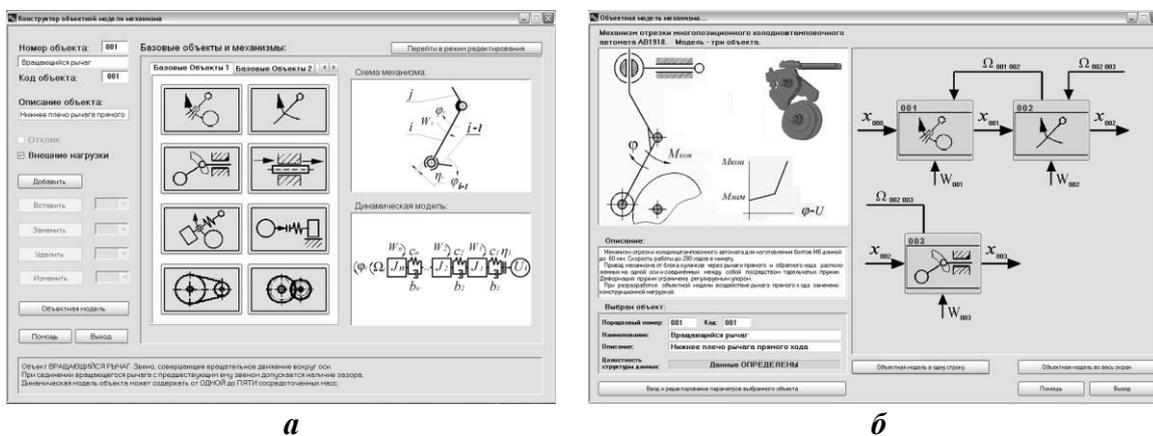
$U_i(\varphi_k), U'_i(\varphi_k)$ – функция положения рычага и её производная.

Для определения величин c_1 , b_m используются зависимости, приведённые в работе [3]. Функции $U_i(\varphi_k)$, $U_i'(\varphi_k)$ – множество значений, количество которых зависит от шага интегрирования уравнений (1) и временного интервала, на котором это интегрирование осуществляется.

Решение задач, связанных с построением объектно-ориентированных моделей, расчётом её параметров и проведением динамических исследований, автоматизировано. Комплекс программ, объединённый в единую систему (*dam* – динамический анализ механизмов), включает ряд модулей. Основные из которых следующие:

1. Создание и открытие проекта. Проект – это определённым образом организованный набор различного типа файлов, в которых хранится информация об объектах, связях между ними и их параметрах, а также описание исследуемого механизма.

2. Построение объектно-ориентированного представления механизма. На рисунке 4а показана основная часть этого модуля, в котором из уже готовых объектов осуществляется сборка объектного представления механизма или его редактирование.



а **б**
Рисунок 4 – Конструктор объектного представления механизма (а) его объектная модель (б)

Для отображения объектной модели (рисунок 4б) и информации обо все составляющих её объектах достаточно “щёлкнуть” по кнопке <Объектная модель>. Из окна “Объектная модель механизма” можно загрузить модуль ввода, редактирования и тестирования параметров выбранного объекта.

3. Модули ввода, редактирования и тестирования параметров объекта (рисунок 5). Характерными особенностями данных модулей (их количество равно числу объектов) являются:

- Определение числа масс (сложности) модели. Уже на стадии определения параметров объекта могут быть определены его динамические характеристики, как в зависимости от сложности модели, так и при различных значениях её упруго-инерционных параметров в области их допустимых значений. По существу, такая процедура позволяет заменить натурный эксперимент численным и, таким образом, “экспериментально” проверять каждый из объектов объектного представления механизма на “доброкачественность” [3], что в известной степени **позволяет снять вопрос о достоверности результатов динамических исследований**, выполняемых с помощью системы *dam*.

- Ввод упруго-инерционных и диссипативных параметров модели. Значения этих параметров **могут быть определены с достаточной точностью при минимальной трудоёмкости**, если проектирование механизма осуществляется в одной из систем твёрдотельного моделирования, например, *Inventor Professional* фирмы *Autodesk* [3, 4].

- Наличие библиотеки типовых функций положения, позволяющей в различных вариантах реализовать следующую схему идеального перемещения входного звена объекта: подъём (прямой ход) – верхний выстой – опускание (обратный ход) – нижний выстой.

- Ввод данных о зазорах и погрешностях изготовления.
- Широкие возможности для определения функций внешних нагрузок для каждой из масс динамической модели объекта и их разделение на три группы: силы трения, конструкционные и технологические нагрузки.
 - Сохранение различных вариантов данных отдельно по упруго-инерционным характеристикам, функциям положения, зазорам, погрешностям изготовления и внешним нагрузкам для каждого объекта.
 - Возможность выполнения тестирования введённых данных.

На рисунке 5 показано окно ввода данных объекта "Вращающийся рычаг" в режиме проектирования функции положения на участке прямого хода.

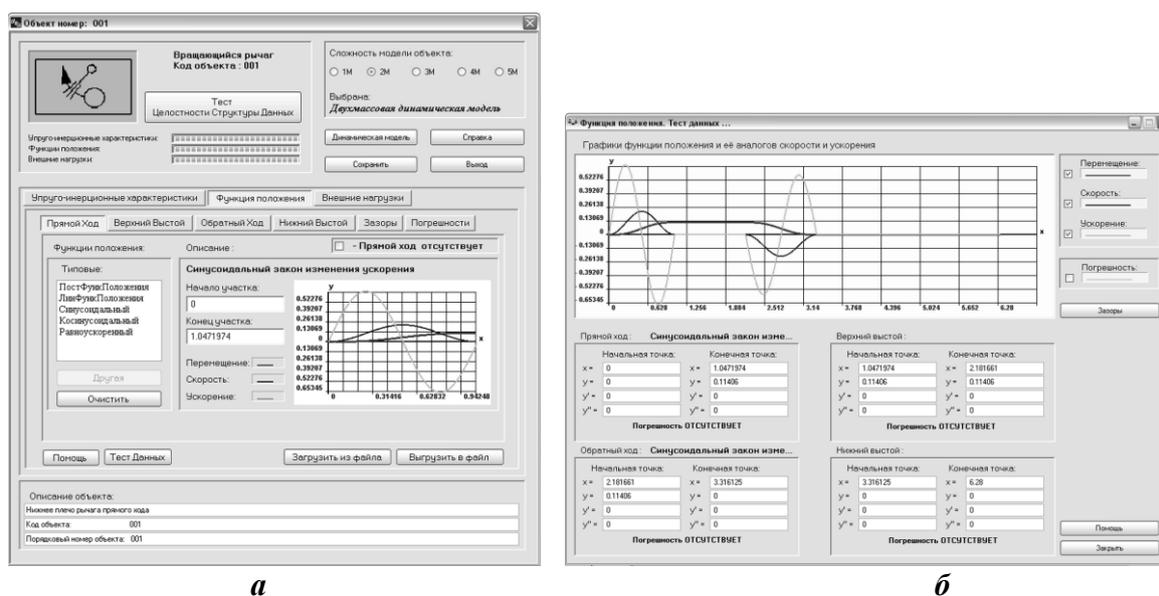


Рисунок 5 – Окно ввода данных объекта "Вращающийся рычаг" в режиме проектирования функции положения на участке прямого хода (а) и её тестирования (б)

4. Динамический анализ механизма (рисунок 6). Данное приложение совокупность динамических моделей, соответствующих объектному представлению механизма, преобразует в математическую модель – системы дифференциальных уравнений. Для их решения используются метод Эйлера.

Рассматриваемое приложение предоставляет широкие возможности, связанные с управлением входными параметрами механизма, вычислительным процессом, результатами вычислений и их визуализацией. Основные из них следующие:

- Управление производительностью механизма.
- Возможность исключение из расчётной модели в процессе выполнения вычислений различных видов нагрузок, диссипативных сил, зазоров в кинематических парах и погрешности их изготовления.
 - Управление скоростью и точностью расчётов.
 - Возможность получить данные как для всего механизма в целом, так и для каждого из его объектов в отдельности.
- Широкий спектр выходной графической информации. Управление её представлением.
- Определение надёжности и работоспособности механизма (или отдельного его объекта) на основе анализа значений двенадцати типов критериев.
- Возможность сохранения результатов с целью их дальнейшего сопоставления при выборе наиболее рационального конструктивного решения на этапе проектирования механизма.

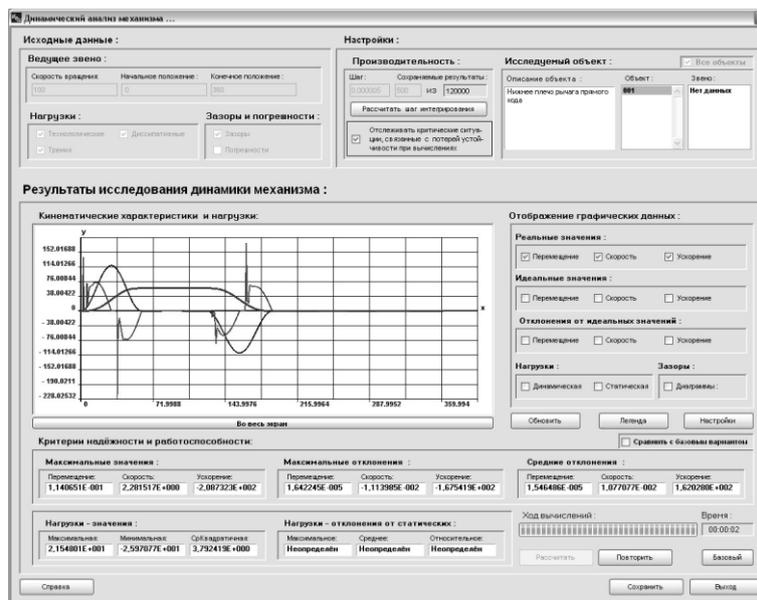


Рисунок 6 – Окно приложения "Динамический анализ механизма"

В графическом окне показаны перемещение (увеличено в 500 раз), скорость (увеличена в 50 раз) и ускорение (в натуральную величину) рычага прямого хода механизма отрезки

Динамический анализ механизма, – это не только расчёт его кинематических параметров, нагрузок и обобщённых критериев качества, но и задачи, связанные с прогнозированием динамических характеристик в зависимости от изменения внешних и внутренних воздействий и условий [3, 4]. Среди таких задач особое место занимает исследование динамики механизма в зависимости от скорости его работы и степени изношенности кинематических пар. Кроме того, конкретно для механизма отрезки представляет интерес расчёт жёсткости и величины затяжки пружины, соединяющей рычаги прямого и обратного хода и величины регулируемого зазора (рисунок 1а, позиции 5 и 6). Непосредственно в данной версии системы *dam* эти возможности реализованы не полностью. Однако выполнение исследований подобного рода не представляет затруднений. Для этого достаточно повторить некоторое число раз расчёты с требуемыми параметрами объектов с сохранением критериев качества в файле результатов. В дальнейшем, сохранённые данные могут быть представлены в графическом виде, например, в системе MatLAB или Maple, для анализа и принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 592 с.
2. Rumbaugh J. et al. Object-Oriented Modeling and Design. – Prentice Hall, 1991. – 500 p.
3. Телегин В.В. Динамика механизмов многопозиционных холодноштамповочных автоматов [Текст]: монография / В.В. Телегин. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 204 с.
4. Телегин В.В. Анализ динамики быстроходных машин-автоматов прессового производства на основе их твёрдотельных моделей // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, Вып. 1, 2004, С. 197–206.

Телегин Виктор Валериевич

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Инженерная графика»

Тел. (4742) 41-54-76,

E-mail: vivt@lipetsk.ru

А.В. ТИТЬКОВА, Н.С. КОБЕЛЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛАСТИЧНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Представлена математическая модель взаимных взаимодействий потока несжимаемой сплошной среды и реакций деформируемых стенок осесимметричного трубопровода. Реализация математической модели позволила получить функциональные зависимости изменения гидродинамических параметров и механических характеристик по длине эластичного трубопровода. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало адекватность математической модели реальному объекту.

Ключевые слова: математическая модель, эластичный трубопровод, модуль упругости, относительная деформация, статическое и динамическое давления, потери давления на трение.

Will Presented mathematical model mutual interaction flow of the incondensable utter ambience and reaction deformed wall osesimetric a pipe line. The Realization to mathematical model has allowed to get the functional dependencies of the change hidrodinamic parameter and mechanical features on length of the rubber-band pipe line. The Collation theoretical and experimental data have shown adequacy to mathematical model real object.

Key words: mathematical model, rubber-band pipe line, module to bounce, relative deformation, steady-state and dinamic pressure, loss of the pressure on friction.

В настоящее время конструкторский расчет эластичных каналов производится при условии неизменности их геометрических размеров.

В действительности, как показывают гидравлические испытания [1,2,3] деформация диаметра поперечного сечения под действием внутреннего давления составляют более 20%. При этом скорость внутренней среды может изменяться на 40%. Поэтому принимаемые допущения, очевидно, становятся некорректными и требуется дальнейшее совершенствование методов расчета с помощью математического моделирования.

При разработке математической модели использовались: закон сохранения энергии, закон сохранения массы, уравнение сплошности несжимаемой среды, уравнение Дарси, закон Гука, уравнение двумерной деформации эластичных материалов.

Приняты следующие допущения:

- стенка трубы выполнена из эластичных материалов методом прессования и считается однородной;
- геометрическая конфигурация трубы представляет осесимметричную оболочку толщиной δ с постоянными физико-механическими свойствами по длине и начальным внутренним диаметром D_0 ;
- напряжения, возникающие в стенке трубы, равномерно распределены по толщине стенки;
- при изгибе поперечное сечение трубы сохраняет форму круга (не теряет устойчивости);
- во внутренней полости трубы движется несжимаемая сплошная среда со средней скоростью v , которая обеспечивает квадратичный режим.

Математическая модель движения несжимаемой сплошной среды в эластичном трубопроводе имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_x}{\partial X} + \frac{\partial v_y}{\partial Y} + \frac{\partial v_z}{\partial Z} = 0, \\ d(\Delta P_n) = \lambda \frac{dx}{D} * P \vartheta = \lambda \frac{dx}{D} * \frac{V^2 p}{2}, \\ \Delta P_n + P + P_d = \text{const } t, \\ d(\Delta P_n) = -dP - dP_\delta, \\ \varepsilon = \frac{\mathfrak{E}}{E}, \\ \mathfrak{E} = \frac{DP}{2\delta}, \\ \mathfrak{E}_x = 0,5 \mathfrak{E}, \\ G = \frac{\pi E}{2}, \\ P = \pi \delta E \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D} \right). \end{array} \right.$$

где ΔP_n – потери давления на трение, Па;

λ – коэффициент гидравлического трения;

D_0, D – внутренний начальный и текущий диаметры эластичного трубопровода, м;

v – средняя скорость жидкости, м/с;

L – расход транспортируемой жидкости, м³/с;

ρ – плотность транспортируемой жидкости, кг/м³;

δ – толщина стенки эластичного трубопровода, м;

P, P_d – статическое и динамическое давления, Па;

$\mathfrak{E}, \mathfrak{E}_x$ – радиальное и осевое напряжения, Па;

$\varepsilon, \varepsilon_x$ – относительные радиальные и осевые деформации, %;

E, E_{oc} – радиальный и осевой модули упругости, Па;

G – равновесный модуль упругости при двухосном растяжении, Па;

Математическая модель имеет замкнутый вид, т.е число неизвестных параметров равно числу уравнений.

Поэтому при реализации математической модели использовались дифференциальное и интегральное исчисления. Что позволило получить функциональные зависимости изменения гидродинамических параметров и механических характеристик по длине эластичного трубопровода.

Внутренний диаметр:

$$D = \sqrt[4]{(mD_0)^4 + B(l-x)} \quad (1)$$

где $B = \frac{1,03 \lambda L^2 p}{\delta E}$;

$$m = \frac{\pi \delta E}{\pi \delta E - D_0 P_k};$$

l – длина эластичного трубопровода;

P_k – статическое давление в конце эластичного трубопровода, Па.

При отсутствии задвижки в конце эластичного трубопровода $P_k = 0$; $x = l$; $D = D_0$.

Средняя скорость движения жидкости:

$$v = \frac{1,27 L}{\sqrt{(mD_0)^4 + B(l-x)}}. \quad (2)$$

Динамическое давление;

$$D_\delta = \frac{0,8 L^2 p}{\sqrt{(mD_0)^4 + B(l-x)}}. \quad (3)$$

Потери напора на трение:

$$\Delta P = 3,1\delta E \left[\frac{1}{\sqrt[4]{(mD_0)^4 + B(l-x)}} - \frac{1}{\sqrt[4]{(mD_0)^4 + Bl}} \right]. \quad (4)$$

Статическое давление:

$$P = \pi\delta E \left[\frac{1}{D_0} - \frac{1}{\sqrt[4]{(mD_0)^4 + B(l-x)}} \right]. \quad (5)$$

Осевая деформация эластичного трубопровода:

$$\Delta x = \frac{0,628E}{mD_0} \left[\sqrt[4]{(mD_0)^4 + B(l-x)} - mD_0 \right]. \quad (6)$$

Радиальные напряжения эластичного трубопровода:

$$\epsilon = \frac{1,57E}{mD_0} \left[\sqrt[4]{(mD_0)^4 + B(l-x)} - mD_0 \right]. \quad (7)$$

С целью установления адекватности математической модели реальному объекту проведены гидравлические исследования эластичного трубопровода. На рисунках 1 – 6 нанесены результаты экспериментальных данных в виде точек и кривых, построенных по функциональным зависимостям.

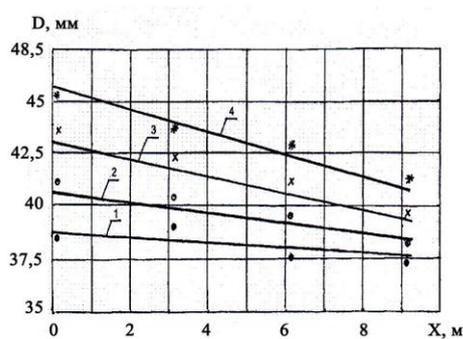


Рис. 1. Изменение внутреннего диаметра эластичного резинового трубопровода по длине при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

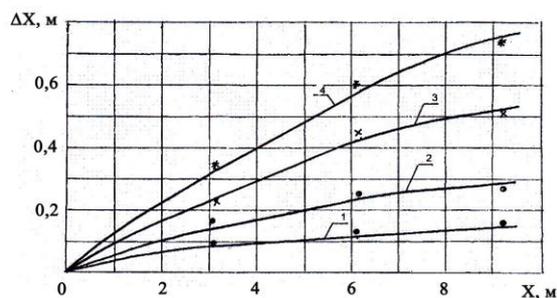


Рис. 2. Изменение осевых удлинений эластичного резинового трубопровода при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

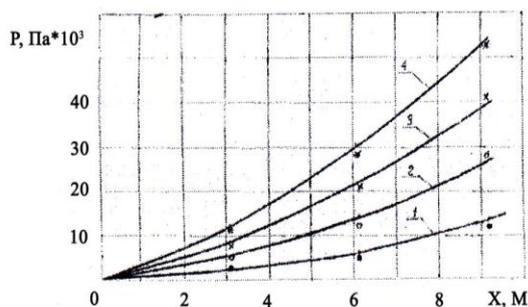


Рис. 3. Изменение потерь давления по длине эластичного резинового трубопровода при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

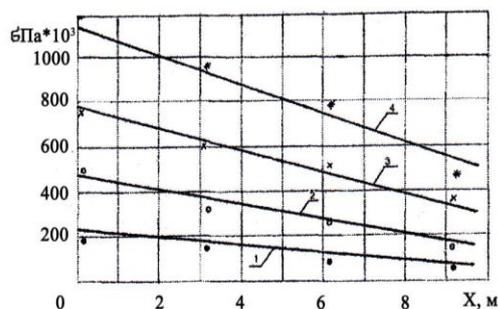


Рис. 4. Изменение радиальных напряжений по длине эластичного резинового трубопровода при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

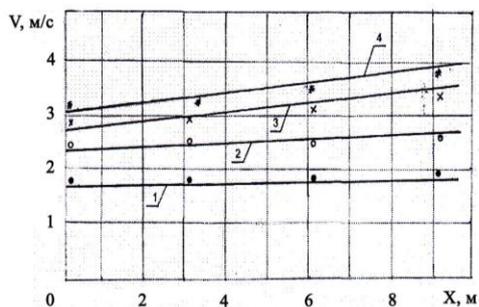


Рис.5. Изменение средней скорости по длине эластичного резинового трубопровода при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

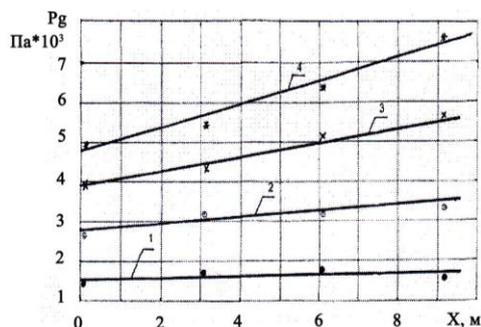


Рис.6. Изменение динамического давления по длине эластичного резинового трубопровода при расходах воды: 1- $2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2- $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3- $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 4- $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Сравнительная оценка теоретических и экспериментальных данных показывает удовлетворительную сходимость. Расхождения теоретических и экспериментальных данных не превышает 6 %. Следовательно, разработанная математическая модель движения несжимаемой жидкости в эластичном трубопроводе, отражает гидродинамические и механические характеристики и адекватна реальному объекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С.Г., Битюков В.А. Применение бесшовных плосковорачиваемых эластичных трубопроводов на поливе сельскохозяйственных культур // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. -1988.-№4.-С.24-27.
2. Битюков В.А. Исследование и разработка эластичного всасывающего рукава для мобильных вентиляционных установок// Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. -1990.-№4.-С.30-32.
3. Битюков В.А., Тинькова А.В., Кобелев Н.С. Влияние гидродинамических процессов на радиальные и продольные деформации эластичного трубопровода // Вибрационные машины и технологии. Сборник научных трудов. Курск, 2008. С.446-450.

Кобелев Николай Сергеевич

Д-р техн. наук, проф. кафедры
теплогазоснабжения и вентиляции
Курский государственный технический университет
Россия, г. Курск, тел. 8-(4712)-55-29-51

Тинькова А.В.

Аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Курский государственный технический университет
Россия, г. Курск, тел. 8-(4712)-55-29-51

УДК 621.316.5

С.Ф. КОРНДОРФ, Г.И. УТКИН, В.В. МАРКОВ

РАЗРУШЕНИЕ РАЗЪЁМНЫХ КОНТАКТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЗАМЫКАНИЯ

В этой статье рассмотрены этапы процесса замыкания электрических контактов. Выполнен анализ электрических процессов, сопровождающих этап сближения контактирующих поверхностей до их устойчивого соприкосновения. Показаны причины изнашивания контактирующих поверхностей.

Ключевые слова: электрический соединитель; коммутация; контакт; трение; износ; электрическая цепь; замыкание электрических контактов; сближение контактирующих поверхностей.

In this article is considers the stages of process circuit the electrical contacts. Is carry out the analysis of electrical processes, which is accompany the stage of rapprochement the contacting surfaces from they steady sharing common frontiers. The causes of wearing the contacting surfaces are showing.

Key words: electrical connection; commutation; contact; friction; wear; electrical chain; circuit the electrical contacts; rapprochement the contacting surfaces.

Процесс замыкания электрических контактов можно подразделить на две стадии:

- 1) этап сближения контактирующих поверхностей до их устойчивого соприкосновения;
- 2) этап увеличения площади соприкосновения контактирующих поверхностей до прекращения движения одной поверхности относительно другой.

Проведём анализ первого этапа – процесса замыкания разъёмных контактов.

При рассмотрении первого этапа следует учитывать, что сближающиеся поверхности контактов никогда не расположены параллельно друг другу, эти поверхности не являются ровными, а все покрыты микронеровностями. Поэтому на поверхностях контактов при их сближении всегда есть микронеровности, расположенные таким образом, что именно между ними возможно возникновение искрового разряда, в первую очередь.

Рассмотрим подробнее процесс сближения таких микронеровностей (рисунок 1).

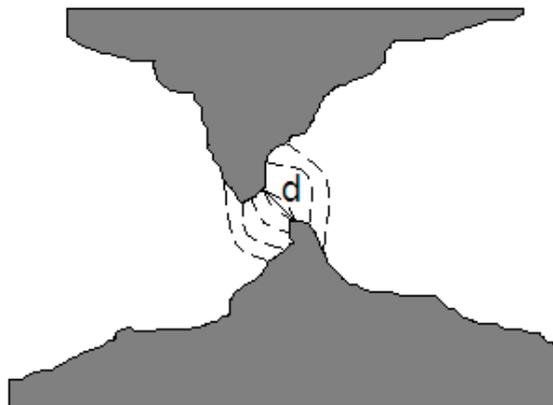


Рисунок 1 – Процесс сближения микронеровностей контактирующих поверхностей

Электрическое поле около выступов проводящей (металлической) микронеровности перпендикулярно ей и, так как поверхности микронеровностей не параллельны друг другу, то это поле искривлено, и поэтому так называемые силовые линии электрического поля непараллельны. Следовательно, кратчайшее расстояние между точками микронеровностей контактирующих поверхностей не позволяет определить напряжённость электрического поля по известной формуле:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1)$$

где U – электрическое напряжение между контактами;

d – кратчайшее расстояние между выступами микронеровностей поверхностей.

Кроме того, у заострений микронеровностей происходит концентрация силы электрического поля, которая приводит к повышению значения его напряжённости.

Пробой воздушного промежутка между поверхностями электрических контактов зависит не только от расстояния между этими поверхностями, но также от неоднородности воздуха, разделяющего выступы. Поэтому значение напряжённости поля, при котором происходит пробой, зависит не только от расстояния между поверхностями контактов.

Исследования показали, что с увеличением расстояния между поверхностями контактов значение пробивной напряжённости поля (электрической прочности диэлектрика) уменьшается, что иллюстрируется рисунком 2 [1].

Это объясняется тем, что в воздушном зазоре между рассматриваемыми поверхностями располагаются неоднородности (дефекты), например, частицы пыли, которые могут быть даже электрически заряженными. Именно около этих частиц зарождается микроразряд, который приводит к проскакиванию искры. С уменьшением расстояния между поверхностями вероятность нахождения таких неоднородностей уменьшается, что приводит к повышению значения пробивной напряжённости поля (или электрической прочности воздуха) $E_{пр}$. Пренебрегая влиянием микронеровностей, неплоскостью и непараллельностью расположения контактирующих поверхностей, можно считать, что пробивное электрическое напряжение между поверхностями определяется формулой:

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot d \quad (2)$$

График зависимости, построенный с помощью данной формулы и с учётом особенностей процесса электрического контактирования реальных металлических поверхностей, имеет вид, показанный на рисунке 3.

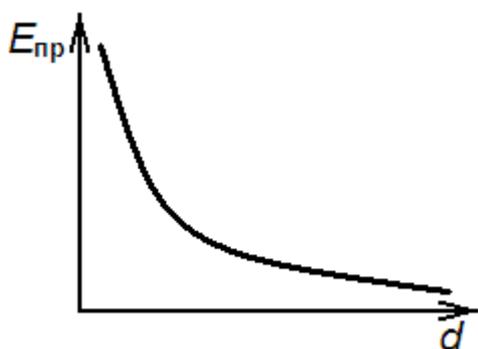


Рисунок 2 – График зависимости пробивной напряжённости воздуха от расстояния между поверхностями контактов

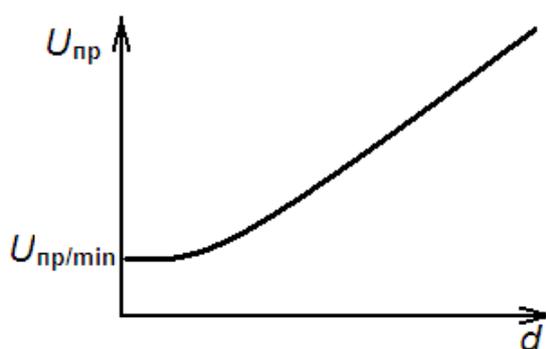


Рисунок 3 – График зависимости пробивного напряжения от расстояния между контактирующими поверхностями

В соответствии с этой зависимостью существует неизменное минимальное значение пробивного электрического напряжения $U_{пр/min}$, и при значениях напряжения U между контактами, соответствующих неравенству

$$U < U_{пр/min}, \quad (3)$$

пробой воздушного промежутка в процессе сближения контактов не происходит, то есть в подобном случае отсутствует эффект разрушения рабочих поверхностей разъёмных электрических контактов за счёт искры, возникающей при их замыкании. Минимальное значение пробивного напряжения $U_{пр/min}$ в первую очередь зависит от характера микронеровностей рассматриваемых поверхностей, и обычно не превосходит *долей вольта*.

В подавляющем числе случаев напряжение на разомкнутых контактах превосходит это значение, и поэтому при сближении контактирующих поверхностей между ними происходит искровой разряд. При данном разряде с поверхности контакта, являющегося *анодом*, вырывается частица материала. Масса m этой частицы практически пропорциональна электрическому заряду q , переносимого искрой:

$$m = k \cdot q, \quad (4)$$

где k – коэффициент, зависящий от состава материала контакта, и от среды, заполняющей промежуток между контактами.

В свою очередь, значение заряда q определяется электрическим напряжением U между контактами соединителя и электрической ёмкостью C между ними:

$$q = U \cdot C \quad (5)$$

Следовательно, для уменьшения массы частицы материала, вырывающейся из анода искрой, надо уменьшать значение ёмкости C . Данная ёмкость состоит из трёх составляющих:

$$C = C_k + C_{пр} + C_{вх}, \quad (6)$$

где C_k – ёмкость между поверхностями сближающихся в процессе замыкания контактов, достигающая своего максимального значения к моменту проскакивания искры;

$C_{пр}$ – ёмкость между выводами контактов в соединителях и проводами, подключающих соединитель к элементам коммутируемой аппаратуры;

$C_{вх}$ – входная ёмкость коммутируемой аппаратуры.

Общая результирующая ёмкость C обычно превосходит значение 20...30 пФ. При использовании электрических прямоугольных соединителей значение ёмкостей $C_{пр} < C_{вх}$.

Перед замыканием контактов площадь микровыступов, образующих искровой промежуток, составляет не более нескольких квадратных микрометров и при расстоянии между микровыступами 1 нм электрическая ёмкость составляет всего несколько пикофард. Если при сближении на такую величину уже не возникло искры, то вероятно её вообще не будет при замыкании контактов, в соответствии с зависимостью, приведённой на рисунке 3.

Таким образом, износ контактов за счёт электрической искры в основном зависит от входной ёмкости коммутируемой аппаратуры. Поэтому при проектировании электрических соединителей необходимо знать, на какие входные ёмкости аппаратуры, и на какое коммутируемое напряжение они должны быть рассчитаны.

При коммутировании цепей постоянного тока роль анода всегда выполняет один и тот же контакт, и поэтому именно он постоянно изнашивается при замыкании цепи. При коммутировании цепей переменного тока роль анода с равной вероятностью исполняют попеременно оба контакта, образующие контактную пару, и поэтому оба контакта изнашиваются из-за искры в одинаковой степени.

Теоретически, вырванная искрой из анода частица металла, заряженная положительно, должна притягиваться катодом, то есть осаждаться на другом электроде. Однако, в действительности, данный процесс протекает много сложнее. Энергия, выделяемая при проскакивании искры, очень мала:

$$A = \frac{v^2 \cdot c}{2}, \quad (7)$$

где v – начальная скорость частицы;

c – массовая удельная теплоёмкость материала поверхности контакта.

Однако этой энергии оказывается достаточно, чтобы разогрев вырванной частицы был достаточно велик, и температура частицы повышается до значения, равного:

$$\Theta = \frac{A}{c \cdot m}, \quad (8)$$

где m – масса частицы.

Данное обстоятельство приводит к тому, что в ряде случаев частица вследствие нагрева испаряется. При проскакивании искры переносимый материал находится в свободном пространстве. Поэтому частица выносится за счёт циркуляции воздуха из промежутка между контактами и не попадает на катод [2]. В других случаях частица материала анода попадает на катод, но из-за большой скорости падения v_k , зависящей от заряда q и массы m частицы,

$$v_k = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot \nu}{m}}, \quad (9)$$

достигая катода, может либо внедриться в него, либо отколоть от поверхности катода микровыступ, превратив часть материала в свободную частицу, что приводит к разрушению катода. При некоторых технологических процессах, сопровождающих электроискровую обработку материалов, износ катода почти достигает по своему объёму износа анода [3].

Износ коммутирующих контактов резко возрастает, если происходит скольжение одной контактной пластины относительно другой, сопровождаемое многократным замыканием и размыканием цепи и, следовательно, многократным возникновением искр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, Б.Р. Электроискровая обработка металлов / Б.Р. Лазаренко. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 272 с.
2. Сотсков, Б.С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры / Б.С. Сотсков. – М.: Машиностроение, 1950. – 506 с.
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие. – в 2-х томах / Под ред. В.П. Смоленского. – М.: Энергия, 1983.

Корндорф Сергей Фердинандович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862)41-98-76
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Уткин Георгий Игоревич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862)41-98-76
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Марков Владимир Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862)41-98-76
E-mail: pms35vm@yandex.ru

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, А.В. КОЗЮРА

ГЕНЕРАТОР ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЕРКИ И СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОАППАРАТУРЫ

Показана актуальность разработки генератора тестовых ЭКГ сигналов. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к характеристикам и функциям устройства. Предложена структурная схема генератора тестовых ЭКГ сигналов.

Ключевые слова: электрокардиография, испытания, генератор тестовых ЭКГ сигналов.

The urgency of test ECG signals generator development is showed. The basic requirements to the device characteristics and functions are examined. The structural scheme of the test ECG signals generator is suggested.

Key words: electrocardiography, testing, test ECG signals generator.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на рынке представлены электрокардиографы, которые рассчитаны не только на распечатку или индикацию на экране монитора электрокардиограмм (ЭКГ), но и электрокардиографы со встроенными системами обработки ЭКГ сигналов для проведения измерений и выдачи интерпретационных диагностических заключений. Все в большей степени стираются различия между программным и аппаратным обеспечением, поскольку аналоговые усилители, использовавшиеся до недавнего времени, стали заменяться электронными цифровыми операционными схемами. Встраивание обработки сигнала во входные части современных электрокардиографов зачастую приводит к появлению нелинейных преобразований, что делает невозможным определение характеристик, базирующихся на применении линейной теории систем. Стандартные испытательные сигналы типа сигналов синусоидальной или ступенчатой формы не могут подаваться на электрокардиографы для проверки их технических характеристик, так как применяемые алгоритмы фильтрации, блокируют их передачу и воспроизведение. Таким образом, стал актуальным вопрос создания новых наборов испытательных сигналов и инструментальных средств для их воспроизведения.

В ходе проекта под названием «Услуги по проведению испытаний на соответствие средств компьютеризированной электрокардиографии» Европейским сообществом был разработан набор сигналов, аналогичных ЭКГ человека, с точно заданными амплитудно-временными характеристиками и сформированными в цифровой форме. Данные сигналы подходят для анализа аппаратных характеристик аналоговых систем и программных характеристик цифровых систем. Также разработаны новые методы испытаний и технические требования к электрокардиоаппаратуре (ЭКП) и инструментальным средствам для испытаний. Финалом проекта Европейского сообщества явилось принятие в 2005 году Международной электротехнической комиссией стандарта IEC 60601-2-51 [1].

В рамках работ проводимых службами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии по внедрению международных стандартов с 1 сентября 2009 года в Российской Федерации вступил в силу идентичный вышеупомянутому международному стандарту ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008 «Изделия медицинские электрические. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к регистрирующим и анализирующим одноканальным и многоканальным электрокардиографам». В связи с этим возник ряд проблем, связанных, во-первых с противоречиями в отдельных пунктах действующего ГОСТ 19687-89 «Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний» и введенного стандарта [2]. Во-вторых, с несовершенством и недостатками

действующей унифицированной методики метрологической поверки электрокардиоаппаратуры Р 50.2.009-2001 [3]. В-третьих, с тем, что в данный момент на Российском рынке отсутствуют сертифицированные аппаратные средства для воспроизведения испытательных ЭКГ сигналов, соответствующих требованиям нового стандарта [4].

Так как в Орловском государственном техническом университете на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» ведутся работы направленные на создание автоматизированной системы контроля технического состояния и метрологической поверки ЭКП, то для решения третьей из выше обозначенных проблем было принято решение о создании генератора тестовых ЭКГ сигналов [5, 6, 7]. Настоящая статья посвящена рассмотрению ряда вопросов связанных с проектированием генератора тестовых ЭКГ сигналов, который бы являлся интегрированной частью разрабатываемой системы.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ГЕНЕРАТОРУ ТЕСТОВЫХ ЭКГ СИГНАЛОВ

Для разработки проекта генератора тестовых сигналов необходимо определить требования, предъявляемые к его техническим характеристикам нормативной документацией, а также требуемые функциональные возможности. Кроме того, важно провести обзор аналогов для того, что бы разрабатываемый продукт был конкурентоспособен.

Характеристики и функциональные возможности генератора тестовых ЭКГ сигналов в основном определяются методиками проводимых испытаний и тестовыми сигналами, регламентированных ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008.

Для тестирования основных аппаратных характеристик электрокардиографов, например их калибровки, линейности усилителей, цепей весовой обработки сигналов отведений, коэффициентов усиления и точности воспроизведения сигналов, частотных характеристик и т.п. необходимо обеспечить формирование так называемых калибровочных ЭКГ сигналов.

Калибровочные ЭКГ сигналы специально разработаны для испытаний характеристик систем в диапазоне амплитуд ± 5 мВ, поэтому в них предусмотрено изменение амплитуды с шагом 500 или 1000 мкВ, начиная с амплитуды ± 500 мкВ. Помимо возможности воспроизведения системой амплитуды важна и ее способность воспроизведения высокочастотных и низкочастотных компонентов сигналов, поэтому некоторые калибровочные ЭКГ сигналы имеют очень короткий комплекс «QRS», а некоторые из них обладают повышенными или пониженными сегментами ST. Главной специфической особенностью калибровочных ЭКГ сигналов являются то, что они идентичны для всех восьми отведений I, II, VI, V2, V3, V4, V5 и V6, что позволяет одновременно проверять каждый канал.

В настоящее время установлены 16 сигналов различных калибровочных ЭКГ (три ЭКГ сигнала используются дважды для различных испытаний):

- а) семь ЭКГ сигналов предназначены для проверки коэффициентов усиления и линейности усилителей;
- б) четыре ЭКГ сигнала предназначены для изучения поведения системы при различных частотах сердечных сокращений;
- в) два ЭКГ сигнала предназначены для проверки частотных характеристик на высоких частотах при наличии на ЭКГ высокочастотных компонентов;
- г) шесть ЭКГ сигналов для проверки частотных характеристик на низких частотах при наличии на ЭКГ низкочастотных компонентов (восходящей/нисходящей частей сегмента ST).

Для проведения проверок программного обеспечения, предназначенного для анализа ЭКГ, были разработаны аналитические ЭКГ сигналы. Специфическими особенностями этих сигналов являются то, что их формы весьма близки к формам реальных биологических ЭКГ. Кроме того сигнал для каждого из отведений отличается от других с точки зрения

амплитуды зубцов, их длительностей, а также времени начала и окончания, как и на реальной ЭКГ.

Чтобы оценить качество работы программного обеспечения электрокардиографа в разных видах испытаний в соответствии со стандартом достаточно 3 аналитических сигнала. Однако, база тестовых сигналов содержит порядка 125 различных видов аналитических ЭКГ сигналов, для того что бы обеспечить возможность проверки точности измерений и распознавания зубцов биологических ЭКГ. Таким образом, чем большее количество аналитических сигналов может воспроизвести генератор, тем качественнее можно оценить работу программного обеспечения аппарата [1].

Общим для аналитических и калибровочных ЭКГ сигналов является то, что они доступны в цифровой форме с частотой дискретизации 1000 и 500 отсчетов/с и с разрешением по амплитуде 1 мкВ.

Для проверки того, насколько надежно ЭКГ система способна проводить измерения при неблагоприятных условиях эксплуатации, был разработан набор сигналов, имитирующий помехи. Испытательная база данных содержит пять типов сигналов, имитирующих помехи, которые могут добавляться к любому контрольному ЭКГ. Данные сигналы сформированы в виде синусоидальной сетевой помехи на частоте 50 или 60 Гц, высокочастотного шума (нефильтрованного белого шума с гауссовским распределением амплитуд) и синусоидальных колебаний базовой линии в сочетании или без высокочастотного шума.

Кроме описанных сигналов согласно ГОСТ 60601-2-51-2008 для различных видов испытаний также могут применяться следующие виды сигналов:

- 1) синусоидальные сигналы;
- 2) прямоугольные сигналы;
- 3) треугольные сигналы;
- 4) специальные сигналы:
 - постоянное напряжение ± 300 мВ и 1В;
 - синусоидальный сигнал частотой 20, 30 и 40 Гц, амплитудой 1 мВ, смещенный меандром амплитудой 1 мВ, частотой 2 Гц и скважностью 2;
 - синусоидальный сигнал частотой 50 и 60 Гц, амплитудой ± 20 В для проведения испытания подавления синфазного сигнала;

Из выше сказанного видно, что генератор тестовых сигналов должен иметь восемь каналов формирования калибровочных и аналитических сигналов для стандартных отведений (диапазон амплитуд ± 5 мВ с шагом 500 мкВ). А также три дополнительных канала: первый для формирования синусоидальных, прямоугольных и треугольных сигналов (диапазон амплитуд ± 5 мВ с шагом 500 мкВ, максимальная частота 500 Гц); второй – для формирования синусоидального сигнала амплитудой ± 20 В; третий – для формирования постоянного напряжения ± 300 мВ и 1В. Все тестовые сигналы, в соответствии с ГОСТ, должны воспроизводиться с относительной приведенной погрешностью до 1% по частоте и амплитуде.

Чтобы обеспечить сопряжение каналов формирования сигналов стандартных отведений с входом электрокардиографа, необходима схема предварительной обработки ЭКГ сигналов, обеспечивающая создание нулевого потенциала для грудных отведений относительно I и II отведения.

Прибор должен иметь встроенную базу тестовых сигналов, необходимых для проведения всех видов испытаний. Эта функция, вместе с автономным источником питания от гальванических элементов, обеспечит большую мобильность использования по сравнению с использованием, так называемых виртуальных приборов (нет необходимости постоянно использовать стационарный персональный компьютер или ноутбук).

Для того, что бы разрабатываемый прибор мог интегрироваться с программно-аппаратным комплексом контроля технического состояния ЭКП, он должен иметь возможность взаимодействия с персональным компьютером. Это необходимо для

обновления микропрограммы устройства, быстрого масштабирования и адаптации встроенной базы данных к возможным изменениям тестовых сигналов, а также обеспечения функции формирования пользовательских сигналов созданных с использованием специализированного программного обеспечения [4].

В данный момент на рынке отсутствуют решения от отечественных производителей, однако в результате проведенного обзора зарубежного рынка приборов, применяемых при сертификационных и производственных испытаниях ЭКП и способных воспроизводить сигналы регламентированные ГОСТ 60601-2-51-2009, были выявлены два тестовых генератора: симулятор пациента ADElektronik PSI 300 и M&S Elektronik (GMC-I Messtechnik) MS410. Недостатком данных приборов является то, что в них отсутствует возможность формирования прямоугольных и треугольных сигналов, а также синусоидального сигнала амплитудой $\pm 20\text{В}$, используемого для проведения испытания подавления синфазного сигнала. Кроме того прибор PSI 300 не удовлетворяет требованию к точности воспроизводиться сигнала по амплитуде (приведенная погрешность составляет 5% вместо необходимого 1%), а MS410 не имеет возможности взаимодействия с персональным компьютером.

Таким образом, генератор, реализующий удовлетворяющий обозначенным выше требованиям будет обладать конкурентными преимуществами на рынке.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА

Для дальнейшей разработки предлагается структурная схема генератора тестовых ЭКГ сигналов, представленная на рисунке 1.

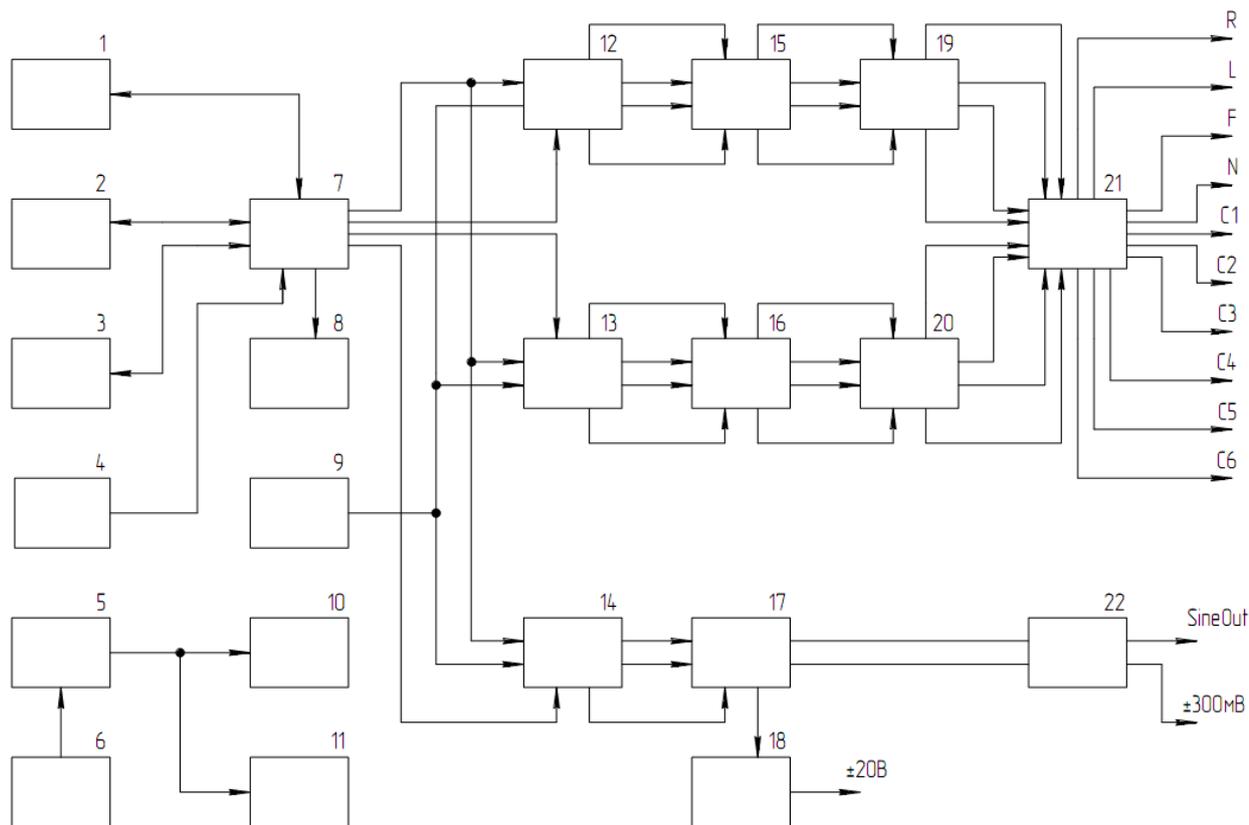


Рисунок 1 – Структурная схема генератора тестовых ЭКГ сигналов

Устройство работает следующим образом. При нажатии кнопки «Вкл.» на клавиатуре 4 сигнал включения поступает на вычислительно-управляющее устройство 7 (далее микроконтроллер), которое инициализирует дисплей 3 и цифро-аналоговые преобразователи 12, 13 и 14.

Для навигации по меню используются четыре клавиши клавиатуры 4. Клавиши «Вверх» и «Вниз» используются для выбора пункта меню. Клавиша «Вперед» используются

для входа в подменю и подтверждения действия. Клавиша «Назад» используется для возврата в предыдущее меню и отмены действия. Все действия пользователя сопровождаются звуковым сигналом, для воспроизведения которого необходима схема звуковой индикации 8.

В режиме формирования сигналов данные из запоминающего устройства 1, необходимые для воспроизведения сигналов заданной формы, обрабатываются микроконтроллером 7 и поступают на вход цифро-аналоговых преобразователей 12, 13 и 14. Цифро-аналоговые преобразователи взаимодействуют с микроконтроллером с помощью последовательного интерфейса периферийных устройств (SPI). С помощью данного интерфейса можно организовать шинную конфигурацию системы, что позволяет быстро коммутировать ЦАП и, соответственно, их выходы для формирования сигналов на необходимых выходах устройства. Также применение данного интерфейса позволяет существенно снизить количество соединений без существенного проигрыша в быстродействии, по сравнению с параллельным интерфейсом. Для того, что бы сократить число элементов в схеме и в тоже время обеспечить заданное количество каналов устройства целесообразно выбирать ЦАП с числом каналов не менее 4. В данном случае два ЦАП и соответственно восемь каналов будут использованы для формирования тестовых ЭКГ сигналов, которые потом будут преобразованы в схеме предварительной обработки ЭКГ сигналов 21 в десять сигналов соответствующих электродов, используемых для получения стандартных отведений. В третьем ЦАП будет использовано три канала: первый для формирования на выходе треугольных, прямоугольных и синусоидальных сигналов (амплитуды ± 5 мВ, ± 4 мВ, ± 3 мВ, ± 2 мВ и $\pm 1,5$ мВ). Второй канал третьего ЦАП – для формирования напряжения смещения ± 300 мВ, постоянного напряжения 1 В, а также прямоугольных импульсов с амплитудой больше 5 мВ. Третий канал – для формирования напряжения от ± 20 В для проведения испытания подавления синфазного сигнала.

Для того, что бы обеспечить возможность формирования ЦАП биполярного сигнала используется преобразователь 10 постоянного напряжения 5 В в биполярное постоянное напряжение ± 5 В. В качестве источника опорных напряжения ЦАП используется источник опорного напряжения 9, формирующий на своём выходе стабильное постоянное напряжение необходимого уровня с высокой точностью. Четырнадцатым выходом устройства является вывод нулевой точки источника питания.

После цифро-аналогового преобразования сигнал поступает на сглаживающие фильтры нижних частот 15, 16 и 17. Частота среза определяется частотой тактовых импульсов ЦАП. Для того чтобы уменьшить число элементов схемы, удешевить устройство и упростить его настройку в качестве фильтров целесообразно использовать специализированные ИМС, которые позволяют реализовать аналоговые фильтры высоких порядков и согласовать частоту среза с частотой тактовых импульсов ЦАП.

Сглаженные сигналы с восьми выходов, используемых для формирования тестовых ЭКГ сигналов, поступает на пассивные аттенюаторы с регулируемым коэффициентом деления 19 и 20, для обеспечения необходимого уровня выходных сигналов, и далее на схему предварительной обработки ЭКГ сигналов 21, реализация и параметры элементов данной схемы регламентированы ГОСТ 60601-2-51-2008. Сигнал с канала, формирующего напряжение смещения ± 300 мВ, также используется в блоке 20 для создания и смещения нулевого потенциала. Сигнал с канала для формирования напряжения ± 20 В поступает на усилитель 18 для того, чтобы привести уровень выходного сигнала к требуемому значению. Схема аттенюатора 22 используемого в канале формирования прямоугольных, треугольных и периодических сигналов аналогичная схемам 19 и 20.

Для питания усилителя 18 в схеме предусмотрен блок преобразователя 11 постоянного напряжения ± 5 В в постоянное биполярное напряжение ± 24 В. В качестве источника питающего напряжения используется гальванический элемент 6. Это позволит использовать устройство автономно, а также снизит уровень влияния помех промышленной сети 50 Гц. Схема питания 5 обеспечивает преобразование напряжения от источника до уровней необходимых для питания элементов схемы.

Для обеспечения возможности взаимодействия с персональным компьютером с целью обновления микропрограммы устройства, а также записи или изменения информации в базу данных сигналов используется интерфейс универсальной последовательной шины USB 2.0 – 2. Минимальная разрядность микроконтроллера определяется разрядностью ЦАП. Быстродействия микроконтроллера должно быть достаточным для работы с LCD дисплеем и цифро-аналоговыми преобразователями. Блоки 1 и 2 могут быть выполнены в виде одной ИМС микроконтроллера. Объем встроенной в микроконтроллер FLASH памяти должен быть достаточным для хранения информации о формах испытательных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генератор тестовых ЭКГ сигналов может быть использован для проведения метрологической поверки, сертификационных и производственных испытаний. Прибор, реализованный в соответствии с предлагаемой структурной схемой, будет востребован на отечественном рынке испытательного оборудования, так как он будет удовлетворять требованиям ГОСТ Р МЭК 60601-2-51 и иметь функциональные преимущества перед зарубежными аналогами. Данное устройство может интегрировано в разрабатываемую систему контроля технического состояния электрокардиоаппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008 Изделия медицинские электрические. Часть 2-51. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к регистрирующим и анализирующим одноканальным и многоканальным электрокардиографам. [Текст]; введен 2009-09-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 66 с.
2. Р 50.2.009-2001. Рекомендации по метрологии. Электрокардиографы, электрокардиоскопы, электрокардиоанализаторы. Методика поверки. [Текст]. Взамен МИ 2398-97; введен 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 30 с. – (Государственная система обеспечения единства измерений)
3. ГОСТ 19687-89 Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний. [Текст]; введен 1990-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 26 с.
4. Козюра, А.В. Проблемы метрологического обеспечения электрокардиографической техники (статья) // Сборник трудов молодых ученых Всероссийской научной школы по биомедицинской инженерии БМИ-2009 СПб.: СПбГЭ-ТУ.-2009. – С.
5. Патент 86300 Российская Федерация RU 86 300 U1. Программно-аппаратный комплекс контроля состояния электрокардиоаппаратуры [Текст] / Б.А. Егоров, А.В. Козюра, К.В. Подмастерьев, М.В. Яковенко. – № 2009113788/22; заявл. 13.04.09; опубл. 27.08.09.
6. Программа для автоматизации метрологической поверки электрокардиоаппаратуры [Текст]: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2009613815 / К.В. Подмастерьев, Б.А. Егоров, А.В. Козюра, М.В. Яковенко; заявитель и правообладатель Орл. гос. техн. ун-т. – № 2009612260; заявл. 18.05.09; зарег. 16.07.09.
7. Егоров, Б.А. Перспективы автоматизации метрологической поверки электрокардиоаппаратуры [Текст] / Б.А. Егоров, А.В. Козюра, К.В. Подмастерьев, А.А. Семин, М.В. Яковенко // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ. – 2008. – № 4-2/272(550). – С. 69-77.

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-21
E-mail: asms-orel@mail.ru

Козюра Алексей Вячеславович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-76
E-mail: aleksei.vk@gmail.com

В.Г. ЛИСИЧКИН, С.Н. ШВЕДОВ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ С РЕЗОНАНСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

Для повышения точности резонансных приборов контроля с линейной частотной модуляцией, применяемых для измерения параметров окружающей среды, предлагается компенсировать погрешность измерений, возникающую от «сноса» резонансной частоты, за счет двухтактной развертки частоты возбуждающего сигнала первичного измерительного преобразователя.

Ключевые слова: резонансный прибор контроля, погрешность измерений, развертка частоты.

For increase of accuracy of the resonant control devices with the linear frequency modulation, parameters of environment applied to measurement, it is offered to compensate the error of measurements arising from "pulling down" of resonant frequency, at the expense of frequency duple development of the primary measuring converter exciting signal.

Key words: resonant control device, error of measurements, development of frequency.

При мониторинге параметров окружающей среды, а также контроле свойств различных материалов и веществ широкое применение находят высокочастотные методы измерений. Эти методы основаны на том, что при внесении среды в высокочастотное электромагнитное поле контролируемая среда либо поляризуется, либо в ней наводятся вихревые токи. Виды поляризационных процессов и распределение вихревых токов зависят от электрических и магнитных свойств среды, геометрической формы и размеров исследуемых образцов, от влажности, температуры, минералогического и химического состава, текстурных и структурных особенностей. Свойства среды при этом определяют по значению реакции, испытываемой источником поля.

Большое распространение находят многопараметровые (многоканальные) системы контроля, в которых свойства среды оцениваются по значениям сигналов разнообразных измерительных преобразователей (емкостных и индуктивных датчиков влажности и температуры, электропроводности, плотности и пр.), как правило, распределенных в пространстве. Особенность резонансных методов заключается в том, что эти датчики включаются в состав колебательного контура, являющегося частью высокочастотного генераторного устройства, и свойства контролируемой среды оцениваются по значениям амплитуды, частоты или фазы сигнала, снимаемого с контура.

Достаточно широко распространен способ построения многоканальных автоматизированных приборов контроля параметров среды, основанный на развертывающем частотном преобразовании [1]. В качестве измерительных преобразователей используются несколько LC -контуров с датчиками, которые служат для преобразования электрических или магнитных параметров контролируемого вещества в приращение емкости ΔC_x либо индуктивности ΔL_x . При настройке контуров на разные резонансные частоты колебаний $f_{\delta 1}, f_{\delta 2}, \dots, f_{\delta N}$ можно последовательно оценивать эти параметры и делать выводы о их величине или соответствии требуемым нормам.

При подаче на N измерительных LC -контуров импульсов линейно-изменяющейся частоты $f_{\hat{a}} = f_{i\hat{a}} + V_f t$ от генератора с большим выходным сопротивлением $R_{\hat{a}\hat{o}}$ (через преобразователь напряжения в ток (ПНТ) и аналоговый коммутатор) будет происходить возрастание амплитуды колебаний U_{mj} в окрестности резонансной частоты каждого LC -контура, обусловленное его избирательными свойствами.

Это дает возможность последовательно во времени выделять частотно-модулированные сигналы $f_{\delta 1} \pm \Delta f_1, f_{\delta 2} \pm \Delta f_2, \dots, f_{\delta N} \pm \Delta f_N$ посредством сравнения с

нулевым уровнем разности фаз возбуждающего и выходных сигналов резонансных систем с емкостными или индуктивными датчиками, и при смене знака фазы $\Delta\varphi$ измерять резонансные частоты LC -контуров и амплитуду сигнала. При таком режиме работы на выходе блока обработки данных можно сформировать частотно-временной код, содержащий информацию о контролируемых параметрах, значения которых будут определяться девиацией частоты Δf_k в каждом измерительном преобразователе и амплитудой его выходного напряжения.

Точность измерений в этом случае ограничивается тем, что при линейном изменении частоты возбуждающего сигнала $f_{\hat{a}}$ измерительных преобразователей в каждом канале возникает погрешность от «сноса» $\Delta f_{\hat{\delta}} \approx V_f T_{\hat{e}}$ резонансной частоты данного LC -контурa [2]. Эта динамическая погрешность зависит как от скорости развертки частоты V_f [кГц/с], так и от постоянной времени LC -контурa $T_{\hat{e}} = Q/\pi f_{\hat{\delta}}$, возрастающей пропорционально его добротности Q . Например, если LC -контур имеет резонансную частоту $f_{\hat{\delta}} = 1$ МГц, то при добротности $Q = 100$ его постоянная времени составляет $T_{\hat{e}} = Q/\pi f_{\hat{\delta}} \approx 30$ мкс. При развертке частоты $f_{\hat{a}}$ импульсов возбуждающего сигнала со скоростью $V_f = 100$ кГц/мс разность фаз между входным и выходным сигналами контурa $\Delta\varphi_{\hat{e}} = 0$ соответствует частоте, составляющей $f_{\hat{a}} \approx f_{\hat{\delta}} + V_f T_{\hat{e}} \approx (10^6 + 3 \cdot 10^3)$ Гц. Следовательно, эта частота отличается от резонансной частоты $f_{\hat{\delta}}$ на величину $\Delta f_{\hat{\delta}} \approx 3$ кГц или на 0,3 %.

Для оценки данной погрешности можно рассмотреть аналитическое описание процессов, происходящих в резонансной системе при воздействии на нее сигнала $u(t)$ с частотой $\omega(t)$, изменяющейся по линейному закону:

$$\omega(t) = \omega_1 + V_{\omega} t, \quad (1)$$

где V_{ω} – скорость изменения круговой частоты.

Напряжение на входе резонансной системы в этом случае будет определяться выражением

$$u(t) = U_m \cos(\omega_1 t + V_{\omega} t^2 / 2) \text{ при } t \geq 0 \quad (2)$$

Если в качестве выходной величины принять напряжение на емкости контурa (напряжение емкостного датчика в измерительном преобразователе), то импульсную характеристику резонансной цепи можно записать в виде [3]

$$g(t) = \omega_{\hat{n}\hat{a}} e^{-\alpha t} \cos \omega_{\hat{n}\hat{a}} t,$$

где $\omega_{\hat{n}\hat{a}} = \sqrt{\omega_{\hat{\delta}}^2 - \alpha^2}$ – частота свободных колебаний в контуре с потерями;

$\alpha = r/2L$ – коэффициент затухания контурa;

$\omega_{\hat{\delta}} = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота (частота свободных колебаний в LC -контуре без потерь).

В большинстве практических случаев выполняется равенство $\omega_{\hat{n}\hat{a}} \approx \omega_{\hat{\delta}}$.

Если реакция электрической цепи $U_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(t)$ находится в виде свертки воздействия $u(t)$ и импульсной характеристики цепи $g(t)$, то можно выразить выходное напряжение контурa при развертке частоты следующим образом:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(t) = \int_0^t u(\tau) g(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет достаточно сложный характер, точное аналитическое решение его затруднительно, поэтому могут использоваться лишь численные методы. В результате их применения данное выражение может быть приведено к более простому виду [3]

$$U_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(t) = U(t) \cos(\omega_1 t + V_{\omega} t^2 / 2 + \varphi(t)),$$

где огибающая амплитуд напряжения $U(t)$, мгновенная частота и фаза зависят не только от параметров измерительного преобразователя, но и от скорости изменения частоты V_ω .

Графики огибающих амплитуд напряжения $U(t)$, вычисленных для нескольких значений отношения $\Delta\omega/\sqrt{V_\omega}$, показаны на рисунке 1.

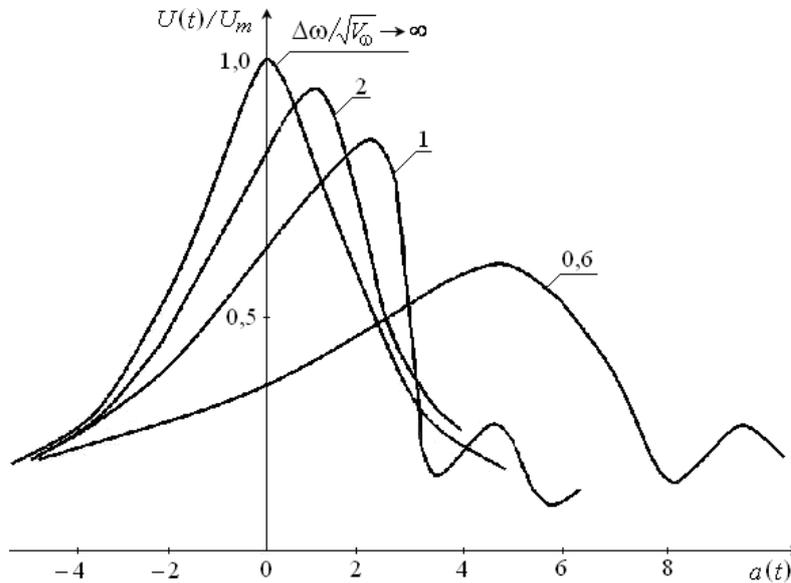


Рисунок 1 – Графики изменения огибающих амплитуд колебаний при линейном возрастании частоты входного напряжения

По оси абсцисс (рисунок 1) отложена величина обобщенной расстройки

$$a(t) = \frac{2\Delta\omega(t)}{\omega_\delta} \cdot Q = \frac{\omega(t) - \omega_\delta}{\omega_\delta} \cdot Q.$$

Верхняя кривая (рисунок 1), соответствующая медленному изменению частоты ($\Delta\omega/\sqrt{V_\omega} \rightarrow \infty$ или $V_\omega \rightarrow 0$, когда скорость изменения частоты бесконечно мала) является обычной резонансной кривой, снимаемой в стационарном режиме. С уменьшением параметра $\Delta\omega/\sqrt{V_\omega}$ (или при увеличении V_ω) возникает ряд неприятных явлений (с точки зрения точности высокочастотных измерений резонансным способом).

Во-первых, максимальные значения огибающих амплитуд выходного сигнала не совпадают с резонансной частотой колебательного контура. Это явление носит в известной литературе название «снос» резонансной частоты.

Как видно из графиков рисунка 1, величина этого «сноса» возрастает при увеличении скорости V_ω изменения частоты. Так как результат измерений электрических и магнитных параметров среды скрыт в значении резонансной частоты, то явление «сноса» вносит дополнительную погрешность.

Кроме того, при увеличении скорости развертки частоты V_ω наблюдается уменьшение максимального значения огибающей, резонансная кривая «размывается» и становится несимметричной, что также повышает погрешность измерений.

Аналогично изменяется огибающая амплитуд при линейном уменьшении частоты, когда увеличение скорости V_ω понижения частоты сигнала приводит к появлению отрицательных значений расстройки $a(t)$.

С целью проверки полученных результатов проведено имитационное моделирование с помощью программы «Mathcad». В качестве модели резонансной системы принят параллельный колебательный контур с выходным сигналом в виде напряжения $u(t)$ и входным сигналом в виде тока $i(t)$ (рисунок 2),

где L_{Π} – полная индуктивность цепи;

C_{Π} – полная емкость, включающая емкость контура и емкость датчика, подключенного к контуру;

G – проводимость, учитывающая активные потери в контролируемом материале и в элементах контура.

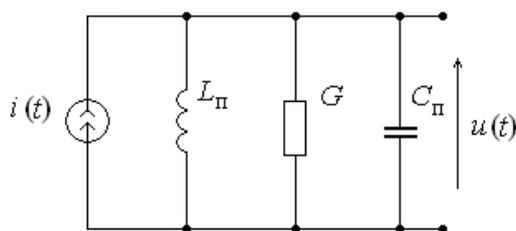


Рисунок 2 – Схема замещения резонансной системы измерительного преобразователя

Согласно [3], процессы в такой системе описываются неоднородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$b_2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) = a_0 + a_1 \frac{di(t)}{dt}, \quad (4)$$

которое для рассматриваемой цепи может быть записано в виде

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{\omega_{\delta}}{Q} \frac{dy}{dt} + \omega_{\delta}^2 y = \frac{1}{C_i} \frac{dx}{dt}, \quad (5)$$

где $y = u(t)$; $x = i(t)$; $a_0 = 0$; $a_1 = \frac{1}{C_i}$; $b_0 = \omega_{\delta}^2$; $b_1 = \frac{\omega_{\delta}}{Q}$; $b_2 = 1$; $\omega_{\delta} = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$;

$$Q = \sqrt{\frac{C_i}{L_i}} / G.$$

Пусть на цепь воздействует сигнал с частотой, изменяющейся по линейному закону (ЛЧМ-сигнал). С учетом выражения (1) и условия $V_{\omega} = \Delta\omega/T$, круговую частоту сигнала можно представить в виде:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega t / T, \quad (6)$$

где $\Delta\omega$ – девиация частоты;

T – длительность ЛЧМ-сигнала.

С учетом (6) для входного сигнала можно записать:

$$i(t) = I_0 \sin\left(\int \omega(t) dt\right) = I_0 \sin\left(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega t^2}{2T}\right) = I_0 \sin\left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega/\omega_0}{2T\omega_0} (\omega_0 t)^2\right].$$

Преобразуем уравнение (5) с учетом параметров ЛЧМ-сигнала:

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + \frac{1}{Q} \frac{f_{\delta}}{f_0} \frac{dy}{d\tau} + \left(\frac{f_{\delta}}{f_0}\right)^2 y - \frac{1}{C_i \omega_0} \frac{dx}{d\tau} = 0, \quad (7)$$

где $\tau = \omega_0 t$ – текущая фаза.

Решение линейного дифференциального уравнения (7) было выполнено методом Рунге – Кутты 4-го порядка на основе математического пакета программ «Mathcad» с помощью обращения к функции gkfixed. По результатам решения построены графики для выходного сигнала, которые представлены на рисунке 3. Статические АЧХ и ФЧХ показаны на рисунках 3, а, б, а на рисунках 3, в, г, д – выходной сигнал при $I_0 = 1$, $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 500$ кГц,

$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 1000$ кГц, $f_{\delta} = 1000$ кГц, $Q = 100$ и разных значениях скорости изменения

(развертки) частоты ЛЧМ-сигнала, указанных в подписях к рисункам.

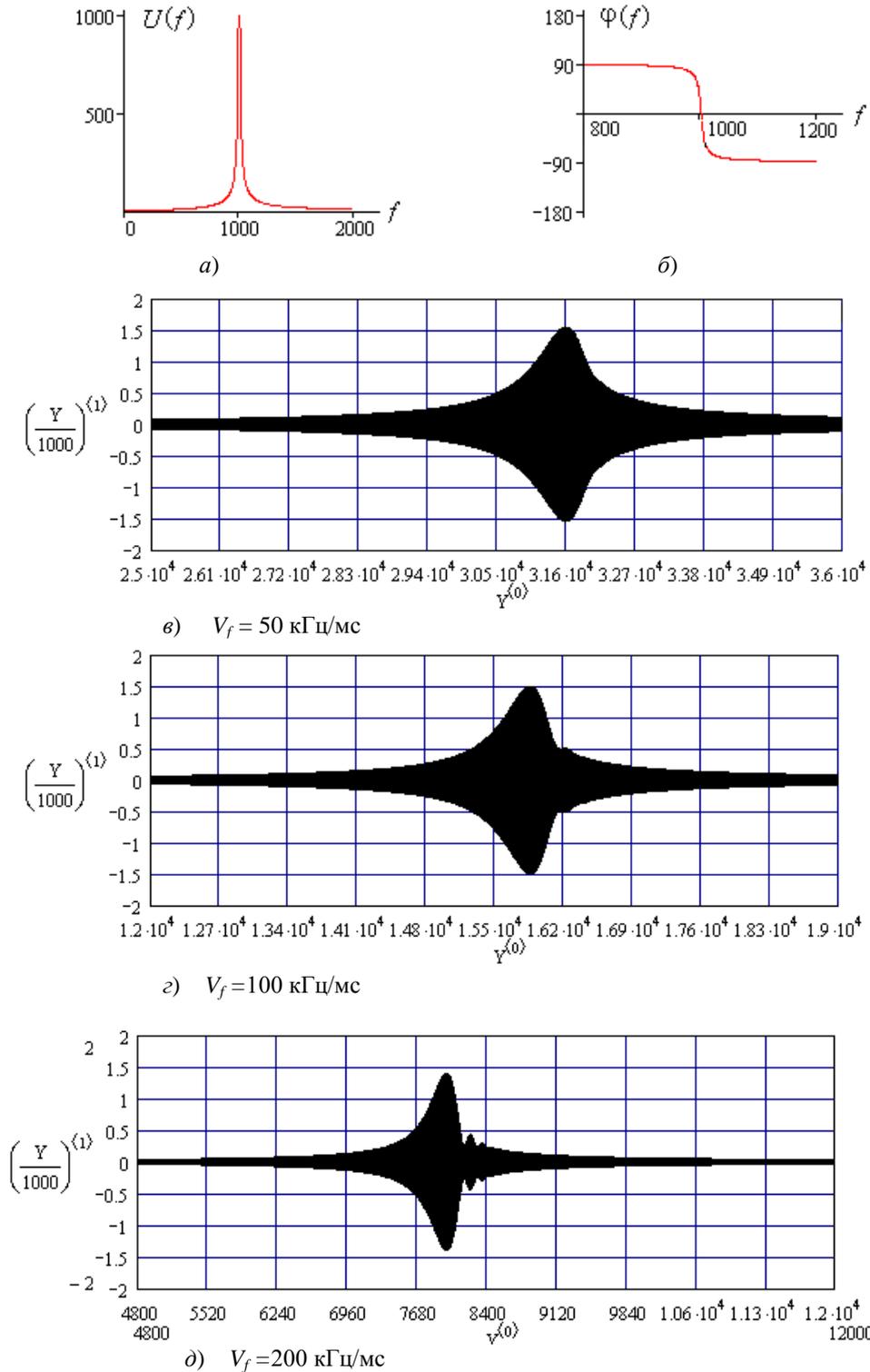


Рисунок 3 – Статические характеристики (а, б) и диаграммы выходного сигнала (в, з, д) параллельного колебательного контура при быстрой перестройке частоты возбуждающего сигнала

Согласно полученным графикам, с ростом скорости перестройки частоты максимум выходного сигнала смещается и уменьшается, а на заднем фронте огибающей появляются осцилляции.

На рисунке 4 представлены графики функций входного и выходного сигналов в области резонанса при перестройке частоты входного сигнала со скоростью $V_f = 100 \text{ кГц/мс}$.

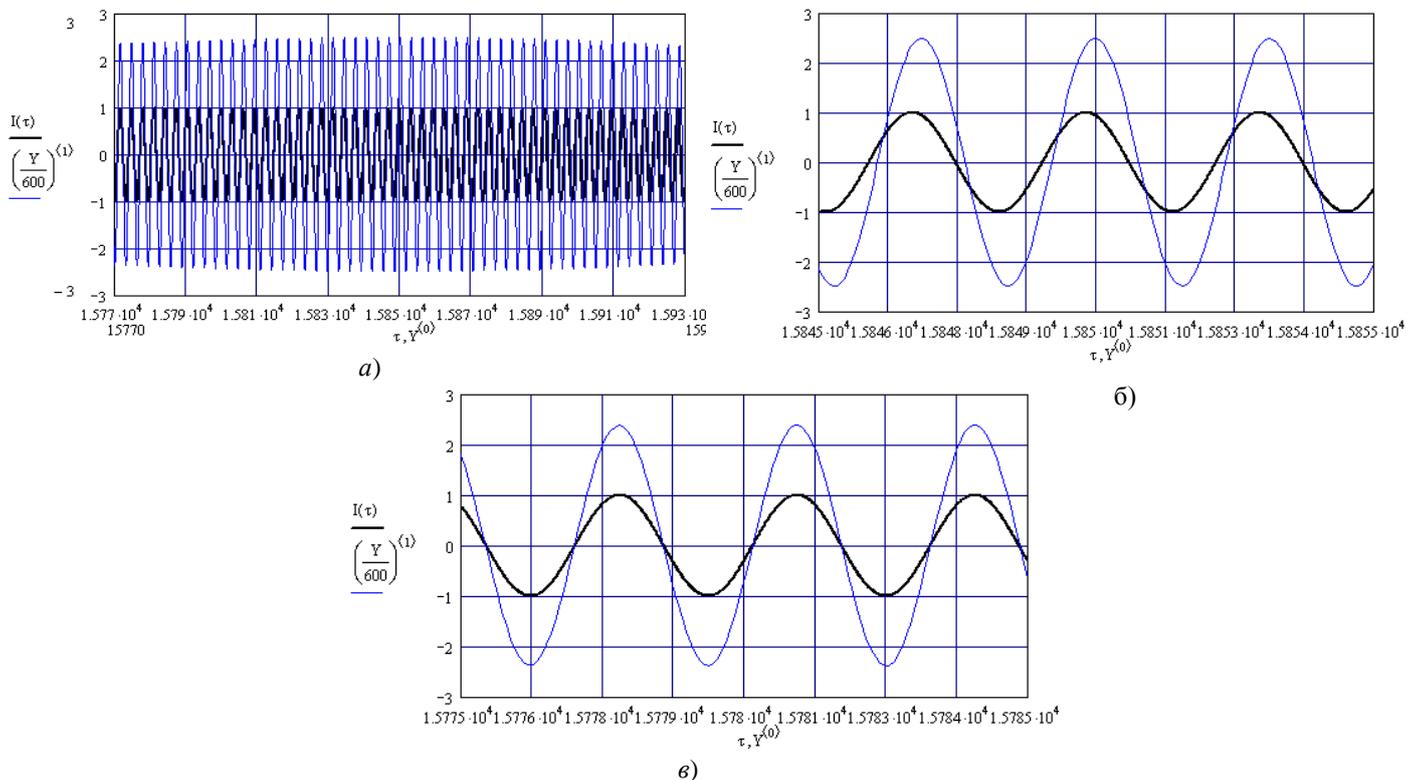


Рисунок 4 – Амплитудный (а, б) и фазовый (в) резонансы в параллельном контуре при перестройке частоты входного сигнала со скоростью $V_f = 100$ кГц/мс

Из рисунка 4, а видно, что амплитудному резонансу (максимуму напряжения на контуре) соответствует достижение текущей фазой значения $\tau = \omega_0 t = 1.585 \cdot 10^4$ рад. Однако фазы сигналов при амплитудном резонансе не совпадают (рисунок 4, б). Фазовый резонанс (рисунок 4, в) возникает несколько раньше, при $\tau = \omega_0 t = 1.5775 \cdot 10^4$ рад. Частоты резонансов можно определить, выделяя время достижения текущего значения фазы $t_n = \tau / \omega_0$, определяя мгновенное значение круговой частоты:

$$\omega(t_n) = \omega_0 + 2\pi\Delta f \cdot t_n / T,$$

а затем и циклической частоты $f_n = \omega(t_n) / 2\pi$.

Вычисленные таким образом частоты амплитудного и фазового резонансов составляют $f_{\delta\lambda} \approx 1004$ ГГц, $f_{\delta\varphi} \approx 1002$ ГГц. Из полученных результатов можно сделать вывод, что в условиях быстрой перестройки частоты возбуждающего сигнала применение фазового параметра значительно уменьшает погрешность определения резонанса в системе.

Для уменьшения влияния эффекта «сноса» и связанной с этим погрешности определения резонансной частоты можно использовать разные алгоритмы развертки частоты возбуждающего сигнала:

1) выполнять развертку частоты $f_{\hat{a}}$ в цикле измерения $T_{\text{есі}}$ за два такта преобразования T_1, T_2 с уменьшением скорости развертки V_{2f} во втором такте в 10...100 раз по сравнению со скоростью развертки V_{1f} в первом такте T_1 ;

2) выполнять двухтактную развертку частоты с одинаковой скоростью и противоположным направлением развертки во втором такте по сравнению с первым ($V_{2f} = -V_{1f}$), после чего вычислять полусумму результатов измерений частоты за два такта преобразования $f_{\delta} = 0,5(f_{\delta 1} + f_{\delta 2})$;

3) устанавливать начальную частоту возбуждающего сигнала на середине диапазона контроля ($f_{\hat{a}} \approx f_{\delta}$) и в зависимости от знака разности фаз $\Delta\varphi$ между возбуждающим и выходным сигналами преобразователя либо увеличивать частоту возбуждения $f_{\hat{a}}$ со скоростью

развертки V_f (при $\Delta\varphi > 0$), либо уменьшать эту частоту со скоростью $-V_f$ (при $\Delta\varphi < 0$);

4) комбинировать перечисленные способы развертки частоты.

Наиболее эффективным представляется первый алгоритм, основанный на изменении скорости и направления развертки частоты возбуждающего сигнала в разных тактах преобразования, который позволяет снизить погрешность «сноса» Δf_{δ} при небольшом увеличении длительности цикла измерения $T_{\text{цикл}}$.

Например, при подаче на LC -контур с частотой резонанса $f_{\delta} = 1$ МГц импульсного возбуждающего ЛЧМ-сигнала в диапазоне от 0,5 до 1,5 МГц со скоростью $V_{1f} = 100$ кГц/мс длительность первого такта преобразования составит $T_1 \approx (f_{\delta} - f_{\min}) / V_{1f} \approx 5$ мс при сносе частоты на $\Delta f_{\delta 1} \approx 3$ кГц. При 100-кратном понижении скорости развертки во втором такте до $V_{2f} = 1$ кГц/мс и одновременном изменении направления развертки возбуждающего сигнала длительность второго такта составит $T_2 = \Delta f_{\delta} / V_{2f} = 3$ мс, а абсолютная погрешность от «сноса» резонансной частоты понижается до уровня $\Delta f_{\delta 2} \approx 30$ Гц, что эквивалентно относительной погрешности $\gamma_{\delta} = 100\Delta f_{\delta 2} / f_{\delta} = 0,003\%$.

Следовательно, применение такого алгоритма позволяет при относительно небольшом увеличении длительности цикла измерения (от 5 до 8 мс) обеспечить 100-кратное уменьшение погрешности «сноса» резонансной частоты LC -контура при линейной развертке частоты возбуждающего сигнала.

Примерно аналогичный результат по снижению погрешности «сноса» получается при реализации второго алгоритма преобразования, основанного на изменении направления развертки частоты возбуждающего сигнала при сохранении постоянной скорости развертки $V_{1f} = V_{2f} = \text{const}$. В этом случае после окончания первого такта необходимо измерить и запомнить первое значение частоты резонанса $f_{\delta 1} = f_{\delta} + \Delta f_{\delta 1}$, а после линейного уменьшения частоты возбуждающего сигнала во втором такте измерить второе значение частоты $f_{\delta 2} = f_{\delta} - \Delta f_{\delta 2}$. После вычисления среднего значения этих двух частот можно получить результат преобразования, который при равенстве «сноса» частот $\Delta f_{\delta 1} = \Delta f_{\delta 2}$ в двух соседних тактах практически не зависит от скорости развертки и соответствует резонансной частоте первичного измерительного преобразователя:

$$f_{\delta \text{нб}} = (f_{\delta 1} + f_{\delta 2}) / 2 = f_{\delta} + 0,5(\Delta f_{\delta 1} - \Delta f_{\delta 2}) \approx f_{\delta}.$$

Таким образом, использование двухтактной развертки частоты в многопараметровых приборах контроля позволяет значительно уменьшить погрешность от «сноса» резонансной частоты, возникающей при осуществлении линейной частотной модуляции, увеличивая тем самым точность измерения контролируемых параметров различных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивные телеизмерительные системы / Под ред. А.В. Фремке. – Л. : Энергоиздат, 1991. – 248 с.
2. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под редакцией Г. С. Самойловича. М. : Машиностроение, 1976. – 456 с.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : Советское радио, 1971. – 672 с.

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехника и электроника»

Тел. (4862) 47-00-96

E-mail: lisichkin@rekom.ru.

Шведов Сергей Николаевич

Академия ФСО России, г. Орел

Преподаватель кафедры «Радиотехника и электроника»

Тел. (4862) 43-14-00

А.П. СМОЛЯКОВ

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ТРЕВОЖНЫХ СООБЩЕНИЙ ПО ЗАНЯТЫМ ЦИФРОВЫМ КАНАЛАМ СВЯЗИ

Показано, что передача тревожных сообщений по занятым каналам связи в информационно-измерительных системах технических средств охраны позволяет расширить их возможности за счет обеспечения передачи любых сигналов. Представлено разработанное устройство, обеспечивающее передачу сигналов тревожных сообщений по таким системам без нарушения общего графика функционирования системы сигнализации и оповещения.

Ключевые слова: тревожные, сообщения, каналы связи, система, устройство, общий график.

Is shown, that the transfer of the disturbing messages on the engaged channels of communication in information-measuring systems of means of protection allows to expand their opportunities at the expense of maintenance of transfer of any signals. The developed device ensuring transfer of signals of the disturbing messages on such systems without infringement of the general diagram of functioning of system is submitted.

Key words: disturbing, messages, channels of communication, system, device, general diagram.

В настоящее время существует множество различных устройств для передачи тревожных сообщений.

Известны, устройства для передачи тревожных сообщений по телефонным линиям, например [1]. Однако, такие устройства неспособны передавать тревожные сообщения по занятым телефонным линиям.

Известно также устройства для передачи тревожных сообщений по абонентским линиям связи, которые позволяют использовать и занятые линии связи [2]. Однако, в этих устройствах для передачи тревожных сообщений по занятым линиям связи используется дополнительная модуляция, в результате чего такие устройства требуют усложнения существующих линий связи.

Известны также устройства для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи, содержащие приемно-контрольный прибор, предназначенный для выдачи сигналов опроса состояния контролируемого объекта и сигналов тревожных сообщений о возникновении непредвиденных ситуаций, пульт оператора, а также по меньшей мере первый канал связи, предназначенный для передачи сигналов импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в прямом направлении и включающий в себя первый и второй линейные регенераторы, соединенные соответствующей линией связи [3]. Однако устройства такого типа имеют ограниченные возможности, так как предназначены для эксплуатационного контроля линий связи.

Известны устройства, с помощью которых обеспечивается передача и выделение дополнительной информации в цифровом канале связи с ИКМ за счет размещения битов дополнительного сообщения в неиспользуемых разрядах передаваемого потока ИКМ [4, 5].

Необходимо такое устройство для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи, которое позволяло бы передавать любые сигналы тревожных сообщений и не требовало бы кардинальной переделки существующих каналов связи. Этот технический результат достигается в разработанном устройстве для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи, содержащем приемно-контрольный прибор, предназначенный для выдачи сигналов опроса состояния контролируемого объекта и сигналов тревожных сообщений о возникновении непредвиденных ситуаций, пульт оператора, а также по меньшей мере первый канал связи, предназначенный для передачи сигналов импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в прямом направлении и

включающий в себя первый и второй линейные регенераторы, соединенные соответствующей линией связи [6].

С целью обеспечения вышеуказанных требований в устройство введены:

- преобразователь сигналов тревожных сообщений, предназначенный для преобразования сигналов опроса состояния контролируемого объекта и тревожных сообщений в подмешиваемые кодовые слова;
- первый и второй блоки управления и синхронизации, предназначенные соответственно для введения упомянутых подмешиваемых кодовых слов в сигналы ИКМ, передаваемые по первому каналу связи, и для выделения упомянутых подмешиваемых кодовых слов из сигналов ИКМ, передаваемых по первому каналу связи;
- блок восстановления сигналов выделенных сообщений, предназначенный для преобразования сигналов опроса состояния контролируемого объекта и тревожных сообщений из выделенных подмешиваемых кодовых слов и для подачи восстановленных сигналов опроса состояния контролируемого объекта и тревожных сообщений на пульт оператора.

Первый блок управления и синхронизации предназначен для введения упомянутых подмешиваемых кодовых слов в первом линейном регенераторе в передаваемые сигналы ИКМ по одному биту в каждый очередной кадр с заменой заранее заданного бита, не несущего никакой информации в кадре согласно используемому протоколу связи, а второй блок управления и синхронизации предназначен для выделения упомянутых заранее заданных битов из каждого кадра принятых сигналов ИКМ с восстановлением первоначальных значений этих битов во втором линейном регенераторе и формирования из выделенных битов упомянутых выделенных подмешиваемых кодовых слов.

Дополнительным отличием устройства является то, что оно содержит также второй канал связи, предназначенный для передачи сигналов импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в обратном направлении и включающий в себя третий и четвертый линейные регенераторы, соединенные соответствующей линией связи, при этом блок восстановления сигналов выделенных сообщений дополнительно предназначен для преобразования сигналов с пульта оператора в подмешиваемые кодовые слова, второй блок управления и синхронизации дополнительно предназначен для введения в третьем линейном регенераторе упомянутых подмешиваемых кодовых слов в сигналы ИКМ, передаваемые по второму каналу связи, первый блок управления и синхронизации дополнительно предназначен для выделения в четвертом линейном регенераторе упомянутых подмешиваемых кодовых слов из сигналов ИКМ, передаваемых по второму каналу связи.

Преобразователь сигналов тревожных сообщений дополнительно предназначен для преобразования сигналов управляющих сообщений из выделенных подмешиваемых кодовых слов и для подачи восстановленных сигналов управляющих сообщений на приемно-контрольный прибор, дополнительно предназначенный для исполнения команд в упомянутых управляющих сообщениях.

Еще одно отличие устройства состоит в том, что блок управления и синхронизации содержит:

- оперативную память для временного хранения поступающих кодовых слов;
- постоянную память для постоянного хранения подмешиваемых кодовых слов, каждое из которых соответствует определенному сигналу приемно-контрольного прибора;
- анализатор кодового слова для:
 - управления записью очередного кодового слова в оперативную память по управляющему сигналу извне,
 - для периодического сравнения кодового слова в оперативной памяти с набором заранее заданных кодовых слов,
 - для выдачи сигнала выбора соответствующего подмешиваемого кодового слова при совпадении очередного кодового слова в оперативной памяти с одним из заранее заданных кодовых слов упомянутого набора;
- контроллер для управления упомянутым введением подмешиваемого кодового слова в сигнал ИКМ, передаваемый по каналу связи, по управляющему сигналу анализатора

кодového слова в случае упомянутого совпадения, а также для управления упомянутым выделением кодového слова из сигнала ИКМ, передаваемого по каналу связи, и записью его в оперативную память.

Анализатор кодového слова дополнительно предназначен для выдачи кодového слова из оперативной памяти по управляющему сигналу с контроллера.

Разработанное устройство для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи содержит (рис.1) в общем случае первый и второй каналы 1, 2 связи, соединяющие между собой первую и вторую каналообразующую аппаратуру 3, 4 импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) [6].

В данном случае для удобства изложения блок-схему блока управления и синхронизации в устройстве принято, что оба канала 1, 2 связи - однонаправленные, причем разнонаправленные, но в общем случае они могут представлять собой, например, один двунаправленный канал связи, в котором можно условно выделить прямой (в данном случае первый) канал 1 связи и обратный (в данном случае второй) канал 2 связи.

Для удобства в данном не ограничивающем примере принято, что первый канал 1 связи включает в себя первый и второй линейные регенераторы 5, 6, соединенные между собой соответствующей линией 7 связи, а второй канал 2 связи включает в себя третий и четвертый линейные регенераторы 8, 9, соединенные между собой соответствующей линией 10 связи.

На рис. 1 в целях большей ясности изложения не показаны согласующие блоки между аппаратурой 3, 4 ИКМ и первым-четвертым линейными регенераторами 5, 6, 8, 9, а также (между этими первым-четвертым линейными регенераторами 5, 6, 8, 9 и соответствующими линиями 7, 10 связи).

Конкретное выполнение аппаратуры 3, 4 ИКМ и линий 7, 10 связи может быть любым, отвечающим условиям функционирования, изложенным далее.

На рисунке 1 показаны далее приемно-контрольный прибор 11, предназначенный для выдачи сигналов опроса состояния контролируемого объекта и сигналов тревожных сообщений о возникновении непредвиденных ситуаций, а также дополнительно предназначенный для исполнения команд в управляющих сообщениях.

Контролируемым объектом может быть любой объект, требующий периодической проверки состояния: территория предприятия, сейф в банке, распределительный щит на электрической подстанции, аппаратура жизнеобеспечения и т.п. При этом сигналы опроса состояния контролируемого объекта - это сигналы опроса соответствующих датчиков: температуры, влажности, посторонних запахов, наличия движущихся тел, величины напряжения питания и т.п.

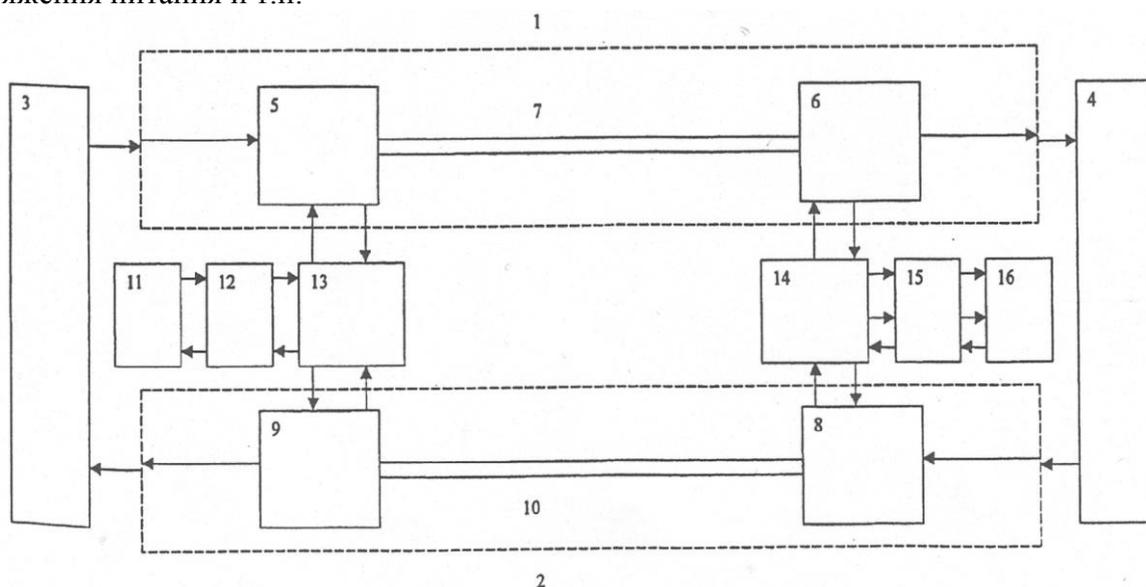


Рисунок 1 – Блок-схема устройства передачи сигналов тревожных сообщений

Непредвиденными ситуациями могут быть, в частности, возгорание, подъем уровня воды, утечка газа, несанкционированное проникновение на охраняемую территорию, отключение электропитания, задымление, регистрация проникающего излучения и т.п. Управляющие же сообщения могут представлять собой, к примеру, команды включить систему пожаротушения, открыть сливной клапан, включить вентиляцию, включить освещение и сирену, перейти на резервное питание, и т.п.

Сигналы опроса и/или тревожных сообщений, представляющие собой сигналы с тех или иных датчиков - в составе приемно-контрольного прибора И или подключенных к нему - поступают на преобразователь 12 сигналов тревожных сообщений, функции которого поясняются здесь далее.

Этот преобразователь 12 сигналов тревожных сообщений подключен к первому блоку 13 управления и синхронизации, который связан как с первым (5), так и с четвертым (9) линейными регенераторами. На фиг.1 блоки 5, 9, 11-13 условно, в целях большей наглядности, образуют передающую сторону. Второй блок 14 управления и синхронизации связан как со вторым (6), так и с третьим (8) линейными регенераторами, а также с блоком восстановления сигналов выделенных сообщений.

Функции первого и второго блоков 13, 14 управления и синхронизации могут быть совершенно одинаковы и рассмотрены ниже, как и функции блока 15 восстановления сигналов выделенных сообщений, который связан с пультом 16 оператора. Выполнение этого пульта 16 оператора может быть любым, лишь бы оно обеспечивало по меньшей мере отображение поступающих выделенных сообщений и возможность формирования команд управляющих сообщений, примеры которых приводились выше.

Выполнение каждого из линейных регенераторов 5, 6, 8, 9 может быть осуществлено на базе стандартной управляющей микросхемы типа LXT360 (LXT318). Обычно линейные регенераторы устанавливаются в линиях передачи примерно через 2-4 км в зависимости от параметров используемого кабеля и служат для восстановления (регенерации) стандартного сигнала ИКМ, передаваемого по этой линии.

Для обычной скорости передачи 2048 Мбит/с такой линейный регенератор должен обеспечивать на своем выходе стандартные уровни импульсов ($\pm 1,5$ В), стандартные длительности импульсов (0,24 мкс), требуемую стандартом крутизну нарастающего и падающего фронтов импульсов. Эти линейные регенераторы могут использоваться, в частности, в качестве исполнительного элемента в мультиплексорах ИКМ-каналов, т.е. для выделения одного или нескольких из 32 ИКМ-каналов в тех местах, где установлены линейные регенераторы. Последнее свойство как раз и используется в настоящем устройстве.

В стандартном потоке ИКМ каждый сигнал передается в виде последовательности кадров, состоящих каждый из 8-битовых последовательностей импульсов, именуемых кодовыми словами. Среди 32 передаваемых ИКМ-каналов имеются два канала (0-й и 15-й), которые служат для передачи различной служебной информации. Согласно стандарту, применяемому для передачи сигналов ИКМ, в каждом кадре служебных каналов имеется хотя бы один неиспользуемый бит.

В данном случае неиспользуемыми являются, к примеру, 0-й и 16-й биты, хотя это и не обязательно, - важно само наличие таких неиспользуемых битов в каждом кадре служебного ИКМ - канала. Это позволяет в настоящем устройстве подставлять в эти неиспользуемые биты другие биты, с помощью которых кодируются сигналы опроса и тревожные сообщения. Такая подстановка (а также удаление подставленных битов из служебного канала) как раз и осуществляется с помощью линейных регенераторов 5, 6, 8, 9.

Для осуществления замены неиспользуемых битов в кадре выбранного служебного канала сигнал любого тревожного сообщения (опроса) нужно сначала преобразовать в соответствующее кодовое слово. Это осуществляется в преобразователе 12 сигналов тревожных сообщений, который может представлять собой, к примеру, просмотрную таблицу, в память которой по разным адресам заранее записаны различные кодовые слова.

При поступлении на вход такого преобразователя какого-либо сигнала с приемно-контрольного прибора 11 активируется то кодовое слово, которое соответствует этому поступившему сигналу, т.е. конкретному тревожному сообщению. С выхода преобразователя 12 это подмешиваемое кодовое слово поступает в первый блок 13 управления и синхронизации.

Как первый (13), так и второй (14) из блоков управления и синхронизации содержит в своем составе (рис. 2) по меньшей мере контроллер 17, анализатор 18 кодового слова, постоянную память 19 и оперативную память 20. Оперативная память 20 предназначена для временного хранения поступающих кодовых слов. Эти кодовые слова могут поступать как извне, например, от преобразователя 12 сигналов тревожных сообщений, так и от остальных элементов блока 13 или 14 управления и синхронизации.

Постоянная память 19 служит для постоянного хранения подмешиваемых кодовых слов, каждое из которых соответствует определенному сигналу приемно-контрольного прибора 12 или же блока 15 восстановления сигналов выделенных сообщений. Кроме того, постоянная память 19 может использоваться для хранения программ работы анализатора 18 и/или контроллера 17, если они не снабжены собственной памятью.

Анализатор 18 кодового слова предназначен, во-первых, для управления записью очередного кодового слова в оперативную память 20 по управляющему сигналу извне (с преобразователя 12 тревожных сообщений или с пульта 16 оператора); во-вторых, для периодического сравнения кодового слова в оперативной памяти 20 с набором заранее заданных кодовых слов, которые могут храниться в постоянной памяти 19 или в памяти самого анализатора 18, если он выполнен в виде микро-ЭВМ; в-третьих, для выдачи сигнала выбора соответствующего подмешиваемого кодового слова при совпадении очередного кодового слова в оперативной памяти 20 с одним из заранее заданных кодовых слов упомянутого набора; и, в-четвертых, для выдачи вонне кодового слова из оперативной памяти 20 по управляющему сигналу с контроллера 17.

Наконец, контроллер 17 служит для управления введением подмешиваемого кодового слова в сигнал ИКМ, передаваемый по каналу 1 или 2 связи, в соответствии с управляющим сигналом анализатора 18 кодового слова в случае совпадения кодового слова из оперативной памяти 20 с одним из заранее заданных кодовых слов, а также для управления выделением кодового слова из сигнала ИКМ, передаваемого по каналу 1 или 2 связи, и записью его в оперативную память 20.

Как уже отмечалось, введение подмешиваемого кодового слова в сигнал ИКМ и выделение этого кодового слова из сигнала ИКМ с соответствующим восстановлением битов этого сигнала ИКМ осуществляется в линейных регенераторах 5, 6, 8, 9. Работа элементов в каждом блоке 13 или 14 управления и синхронизации осуществляется синхронно с передачей и приемом кадров информации, передаваемых по ИКМ - каналам.

Эта синхронизация осуществляется известными методами с помощью известных средств, например, как в ближайшем аналоге, и не приводится здесь, чтобы не перегружать описание.

Устройство для передачи сигналов тревожных сообщений по занятым цифровым каналам связи работает следующим образом.

Каналообразующая аппаратура 3 и 4 осуществляет передачу и прием информации по первому и второму каналам 1, 2 связи. В случае использования только одного (первого) канала 1 связи эта передача осуществляется в одну сторону - от первой каналообразующей аппаратуры 3 ко второй каналообразующей аппаратуре 4. В случае же двустороннего обмена информацией используются как первый, так и второй каналы 1, 2 связи.

В обычных системах ИКМ, как уже отмечено, информация передается по 32 ИКМ-каналам, из которых два канала являются служебными. Здесь следует подчеркнуть, что информационные каналы и служебные каналы, которых может быть больше или меньше, чем указано выше, представляют собой части потока данных, передаваемого по первому или второму каналам 1, 2 связи. Иными словами, название «ИКМ-каналы» относится к последовательностям ИКМ - отсчетов, а название «канал связи» относится к тракту, по которому ведется передача этих последовательностей ИКМ - отсчетов.

В процессе передачи, в частности, по линиям 7, 10 связи, сигналы импульсно-кодовой модуляции испытывают различные помеховые воздействия, искажающие их. Поэтому в линейных регенераторах 5, 6, 8, 9 производится регенерирование (т.е. восстановление) передаваемых сигналов до вида, определяемого используемым протоколом связи.

Далее рассмотрим работу блоков, осуществляющих передачу сигналов опроса или тревожных сообщений с помощью ИКМ - аппаратуры.

Приемно-контрольный прибор 11 осуществляет постоянный или периодический опрос соответствующих датчиков, измеряющих состояние охраняемого (контролируемого) объекта, как отмечено выше, и выдающих сигналы этих измерений. В случае возникновения непредвиденной ситуации какие-либо из этих датчиков или же специально для этого предназначенные датчики выдают соответствующие сигналы. Как сигналы опроса в отсутствие непредвиденной ситуации, так и сигналы тревожных сообщений при возникновении непредвиденной ситуации поступают из приемно-контрольного прибора 11 в преобразователь 12 сигналов тревожных сообщений, в котором появление на входе какого-либо сигнала с какого-нибудь датчика вызывает выдачу соответствующего кодового слова. Это кодовое слово поступает в блок 13 управления и синхронизации, с помощью которого осуществляется подмешивание этого кодового слова в передаваемые по первому каналу 1 связи сообщения.

В блоке 13 управления и синхронизации (рисунок 2) кодовое слово попадает в оперативную память 20 и сохраняется в ней по сигналу анализатора 18. В процессе сравнения этого кодового слова с набором подмешиваемых кодовых слов, хранящихся в постоянной памяти 19, осуществляемого под управлением анализатора 18, определяется совпадение сравниваемых кодовых слов, после чего совпавшее кодовое слово из набора, хранящегося в постоянной памяти 19, поступает в контроллер 17. Под управлением этого контроллера 17 первый линейный регенератор 5 поочередно заменяет неиспользуемый бит в каждом кадре сообщения, передаваемого по служебному ИКМ-каналу, на очередной бит подмешиваемого кодового слова, после чего кадр с замененным битом передается по первой линии 7 связи.

Второй линейный регенератор 6 под управлением контроллера 17 во втором блоке 14 управления и синхронизации выделяет из принимаемых с первой линии 7 связи кадров биты, находящиеся на месте неиспользуемого бита, и заменяет эти выделенные биты их значениями в соответствии с используемым протоколом связи. Скажем, если 0-й бит в этом канале должен иметь нулевое значение, второй линейный регенератор 6 заменяет этот бит в каждом кадре на нулевое значение для дальнейшей передачи ко второй каналобразующей аппаратуре 2.

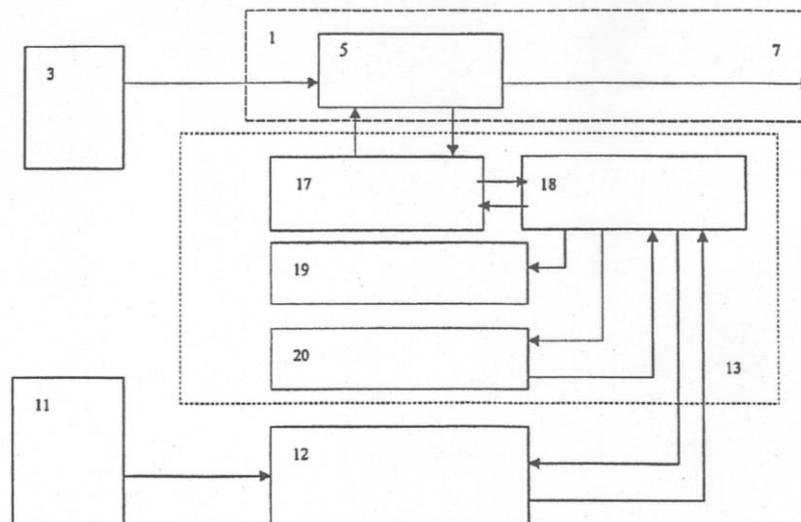


Рисунок 2 – Блок-схема блока управления и синхронизации в устройстве

Выделенные же биты подаются контроллером 17 второго блока 14 управления и синхронизации в его оперативную память 20. Оттуда выделенное кодовое слово, соответствующее одному из сигналов опроса или тревожных сообщений, подается в блок 15 восстановления сигналов выделенных сообщений, который осуществляет преобразование, обратное тому, которое происходило в преобразователе 12 сигналов тревожных сообщений. Выделенный сигнал подается на пульт 16 оператора для отображения и/или записи либо иного использования.

Когда передача ведется в обе стороны, оператор имеет возможность формировать на своем пульте 16 сообщения с соответствующими командами для приемно-контрольного прибора 11. При этом элементы второго блока 15 управления и синхронизации работают точно так, как описано выше для элементов первого блока 13 управления и синхронизации, а элементы первого блока 13 управления и синхронизации работают, соответственно, точно так, как описано выше для второго блока 15 управления и синхронизации при односторонней передаче данных.

В свою очередь, преобразователь 12 сигналов тревожных сообщений приобретает функции, которые описаны выше для блока 15 восстановления сигналов выделенных сообщений.

В результате сформированные на пульте 16 оператора сообщения с командами преобразуются в соответствующие кодовые слова в блоке 15 восстановления сигналов выделенных сообщений и с помощью контроллера 17 во втором блоке 15 управления и синхронизации подмешиваются в третьем линейном регенераторе 8 в передаваемое по второму каналу 2 связи сообщение точно так же, как это описано выше для первого канала 1 связи.

Четвертый линейный регенератор 9 выделяет это кодовое слово точно так, как это описано выше для второго линейного регенератора 6. Выделенное кодовое слово через первый блок 13 управления и синхронизации попадает в преобразователь 12 сигналов тревожных сообщений, где оно преобразуется в сигнал соответствующей команды, который выдается в приемно-контрольный прибор 11.

Этот прибор 11 выполняет эту команду посредством включения или выключения соответствующих исполнительных механизмов либо путем приложения регулирующего сигнала к заданному исполнительному механизму для его соответствующей регулировки.

Таким образом, сигналы опроса состояния контролируемого объекта или тревожные сообщения с этого объекта передаются без использования дополнительных каналов и позволяет передавать любые сигналы в потоке данных по занятому цифровому каналу связи.

Настоящее устройство может применяться в любых существующих или разрабатываемых системах связи с цифровыми каналами, передача по которым осуществляется в соответствии с протоколом, где предусмотрено наличие хотя бы одного неиспользуемого бита хотя бы в одном канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2110094, кл. G 08 B 25/00, опубл. 27.04.1998.
2. Патент РФ №2132572, кл. G 08 B 25/08, опубл. 27.06.1999.
3. Заявка РФ №94018515, кл. H 04 B 3/46, опубл. 27.05.1996.
4. Патент США № 5944843, кл. G 06 F 11/00, опубл. 31.08.1999.
5. Патент РФ № 2113767, кл. H 04 J 3/17, опубл. 20.06.1999.
6. Патент РФ № 2231125, кл. 7G08B 25/08, опубл. 20.06.2004.

Смоляков Андрей Петрович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Аспирант

Тел. (499) 2687694

E-mail: garvad@mail.ru

УДК 620.179.14

С.В. КЛЮЕВ, П.Н. ШКАТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ВИХРЕТОКО-МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Рассматриваются процессы взаимодействия с поверхностными и подповерхностными объемными дефектами комбинированным вихретоко-магнитным методом контроля. Вихретоковые и магнитные процессы взаимодействия моделируются методом конечных элементов. Объемные дефекты имитируются глухими отверстиями на внешней и тыльной сторонах пластины. Исследованы основные взаимосвязи регистрируемых сигналов с условиями контроля и параметрами контролируемого объекта.

Ключевые слова: магнитный контроль, вихретоковый контроль, комбинированный вихретоко-магнитный контроль, неразрушающий контроль, коррозия.

Processes of interaction with superficial and subsurface volume defects the combined eddy-current and magnetic inspections are considered. Eddy-current and magnetic processes of interaction are modeled by a finite element method. Volume defects are simulated by bore recesses on the external and back parties of a plate. The basic interrelations of registered signals with conditions of the control and parameters of controllable object are investigated.

Key words: magnetic inspection, eddy-current inspection, combined eddy-current and magnetic inspection, nondestructive testing, corrosion.

Дефекты типа коррозионных поражений характерны для трубопроводов, сосудов высокого давления, котлового оборудования из ферромагнитных сталей. В процессе эксплуатации поверхность соответствующих объектов подвергается различным воздействиям, приобретая повышенную шероховатость, слои грязи, ржавчины и т.п. Это затрудняет применение ультразвуковых средств контроля, обеспечивающих выявление коррозионных поражений, развивающихся с тыльной стороны.

Для дефектоскопии ферромагнитных объектов широко применяются вихретоковый (ВК) и магнитный (МК) виды контроля. ВК обеспечивает высокую чувствительность к параметрам поверхностного слоя металла и достаточно прост в реализации. Однако чувствительность ВК резко падает по мере удаления контролируемого слоя от поверхности, что связано с проявлением скин-эффекта.

МК обеспечивает выявление как поверхностных, так и подповерхностных дефектов. Регистрация дефектов при МК проводится путем измерения градиентов магнитных потоков рассеяния в достаточно малых объемах над дефектным участком (метод MFL). С увеличением глубины залегания подповерхностного дефекта создаваемые им потоки рассеяния становится все труднее регистрировать на фоне изменений напряженности магнитного поля, связанных с влиянием мешающих факторов.

Вихретоковая дефектоскопия основана на регистрации изменения вторичного магнитного поля вихревых токов за счет деформации их контуров под влиянием дефектов. При вихретоковой дефектоскопии для уменьшения влияния вариации магнитной проницаемости и увеличения глубины проникновения вихревых токов применяют подмагничивание постоянным магнитным полем. При этом регистрация дефектов происходит за счет искажения контуров вихревых токов, обтекающих дефект. Наилучшие условия выявления дефекта достигаются в том случае, когда плотность вихревого тока имеет максимальную величину в дефектном слое. Напряженность H_n подмагничивающего поля должна обеспечивать как можно меньшую величину магнитной проницаемости контролируемого участка. Обычно стремятся довести материал контролируемого участка до технического насыщения, наступающего при превышении H_n определенной величины, зависящей от марки контролируемого металла.

Таким образом, для наилучшего выявления дефектов вихретоковым методом с применением подмагничивания необходима оптимизация рабочей частоты f , а влияние намагничивающего магнитного поля на эффективность дефектоскопии носит монотонный характер.

Вместе с тем, функции распределения напряженности H постоянного магнитного поля в металле при наличии и отсутствии дефекта существенно различаются. Это приводит к изменению магнитной проницаемости металла в окрестности дефекта, в том числе и на его поверхности. Таким образом, создается возможность считывания информации о дефектах по изменению магнитных свойств металла, что реализуется ВК. Здесь используется комбинирование МК и ВК, так как с помощью МК формируется информация о дефекте, а с помощью ВК осуществляется ее считывание. Идея подобного комбинированного метода, получившего название SLOFEC (Saturation Low Frequency Eddy-Current), принадлежит фирме Kontroll Technik (Германия). При технологии SLOFEC стремятся использовать низкочастотные вихревые токи, обеспечивая максимально возможную глубину их проникновения [1].

При комбинированной вихретоко-магнитной дефектоскопии эффективность выявления дефектов определяется величиной H_n намагничивающего магнитного поля, так как здесь важен контраст, создаваемый за счет изменения магнитной проницаемости. При увеличении H_n выше оптимального значения будет происходить выравнивание магнитных проницаемостей по всему объему металла, что приведет к ухудшению выявляемости дефектов. Таким образом, при комбинированной дефектоскопии вихретоко - магнитным методом необходима оптимизация H_n . С другой стороны, для выявления дефектов достаточно считывать информацию с тонкого поверхностного слоя, что достигается после превышения определенной величины f вихревых токов. Для оценки параметров выявленных дефектов целесообразно провести оптимизацию величины f .

Для получения количественных оценок влияния параметров H_n и f на выявляемость объемных дефектов выполнялось математическое моделирование методом конечных элементов (МКЭ). Объект контроля имел вид прямоугольной пластины 200×200 мм из ферромагнитного материала толщиной $T = 12$ мм, содержащей дефект в виде глухого отверстия глубиной h и диаметром d на одной из поверхностей. Намагничивание пластины проводилось постоянным магнитным полем с напряженностью H , равномерно распределенным по ее толщине при отсутствии дефекта и ориентированным перпендикулярно к трещине. При использовании реально применяемых на практике П-образных систем намагничивания поле в контролируемом объекте распределено неравномерно. Таким образом, здесь рассматривается предельный и наиболее благоприятный вариант намагничивания.

Регистрация дефекта осуществлялась накладным ВТП, питаемым от источника синусоидального тока и перемещаемым над обеими поверхностями пластины. ВТП состоял из трех установленных с осевым зазором соосных обмоток: дифференциально включенных измерительной и компенсационной, а также размещенной между ними возбуждающей обмотки. ВТП содержал ферромагнитный сердечник диаметром 4,5 мм и длиной 10 мм. Данный ВТП применяется в качестве стандартного в вихретоковом дефектоскопе ВД-90НП, разработанном и выпускаемом МНПО «СПЕКТР» [2].

Геометрическая расчетная модель схематично представлена на рисунке 1, где показано сечение контролируемого объекта, принятая система координат, ВТП и направление намагничивающего поля с напряженностью H .

При перемещении ВТП над внешней поверхностью пластины регистрировался поверхностный дефект, а при перемещении над тыльной стороной пластины – подповерхностный.

Принималось, что перед проведением контроля пластина была размагничена. Для примера, в качестве материала пластины была выбрана конструкционная сталь Сталь 45. По статической кривой намагничивания в зависимости от напряженности постоянного магнитного поля в соответствующей точке расчетной области вычислялась дифференциальная магнитная проницаемость [3], определяющая формирование вихретокового сигнала. На рисунке 2 показано изменение максимумов нормированной амплитуды U_{BH}^* от напряженности H намагничивающего поля,

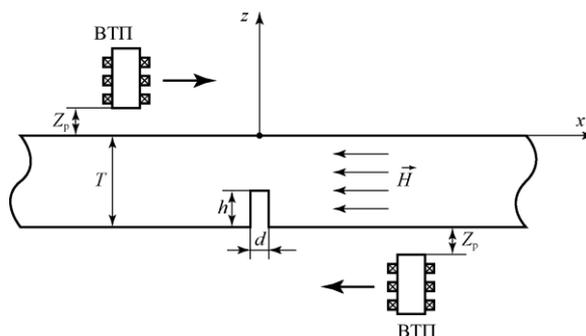


Рисунок 1 – Геометрическая расчетная модель

достигаемых при размещении ВТП с рабочей частотой $f = 50$ кГц над центром поверхностного и, соответственно, подповерхностного (с тыльной стороны) дефектами глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм. Нормировка $U_{вн}^*$ осуществлялась по напряжению холостого хода U_0 , т.е. $U_{вн}^* = U_{вн} / U_0$, рабочий зазор Z_p составлял 1 мм. Из представленных зависимостей следует, что при увеличении величины H амплитуда $U_{вн}^*$, обусловленная влиянием поверхностного дефекта, монотонно уменьшается, а подповерхностного – растет. С дальнейшим увеличением H до величины 9 кА/м $U_{вн}^*$, обусловленная влиянием подповерхностного дефекта, стабилизируется, а затем наблюдается ее незначительное уменьшение. При оптимальной для выявления объемного дефекта с тыльной стороны величине $H = 9$ кА/м и частоте $f = 50$ кГц $U_{вн}^*$ от подповерхностного дефекта примерно в 2 раза меньше $U_{вн}^*$ от поверхностного дефекта с такими же размерами.

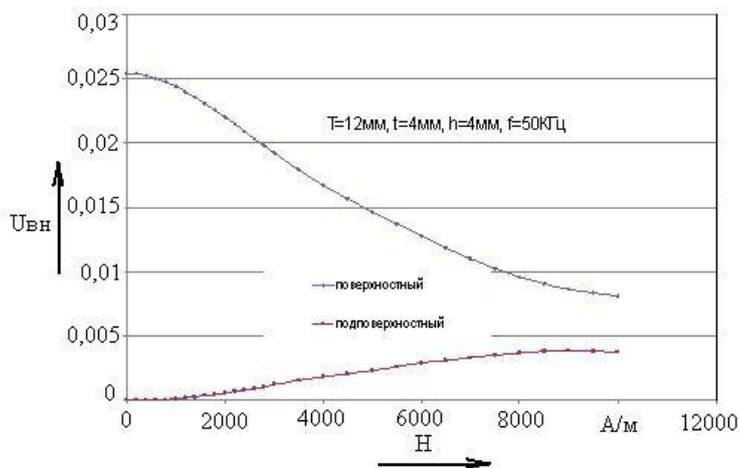


Рисунок 2 – Зависимость максимума $U_{вн}^*$ от напряженности H намагничивающего поля при перемещении ВТП над поверхностным и подповерхностным (с тыльной стороны) дефектом в виде глухого цилиндрического отверстия

величины намагничивающего поля $H \approx 9$ кА/м, так и рабочей частоты $f \approx 50$ кГц. Дальнейшее изменение этих параметров не улучшает эффективности контроля.

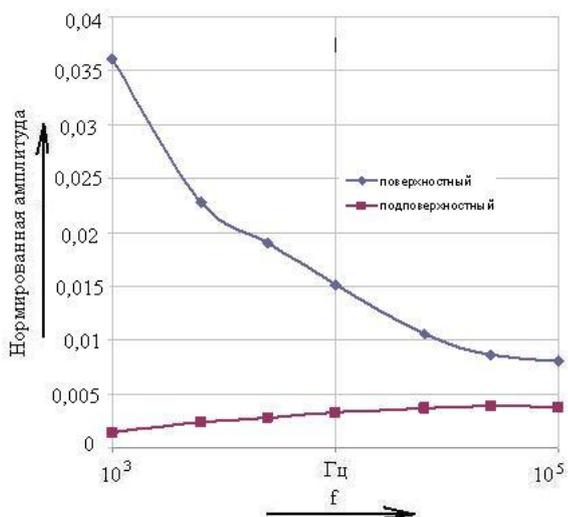


Рисунок 3 – Зависимость максимума нормированной амплитуды $U_{вн}^*$ от частоты при размещении ВТП над центром глухого отверстия глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм при $H = 6$ кА/м

Как следует из рисунка 3, с увеличением рабочей частоты f амплитуда $U_{вн}^*$, обусловленная влиянием поверхностного дефекта, монотонно уменьшается, а связанная с влиянием подповерхностного дефекта – растет. При этом существенные изменения $U_{вн}^*$ наблюдаются до значения $f \approx 50$ кГц. Как правило, требуется выявлять коррозионные поражения, развивающиеся с тыльной стороны контролируемого объекта. При этом различного рода повреждения, например, вмятины на внешней поверхности создают фон, маскирующий выявляемые дефекты. Таким образом, одновременно с повышением чувствительности к подповерхностным объемным дефектам следует стремиться уменьшить влияние поверхностных.

Это достигается путем выбора как величины намагничивающего поля $H \approx 9$ кА/м, так и рабочей частоты $f \approx 50$ кГц. Дальнейшее изменение этих параметров не улучшает эффективности контроля.

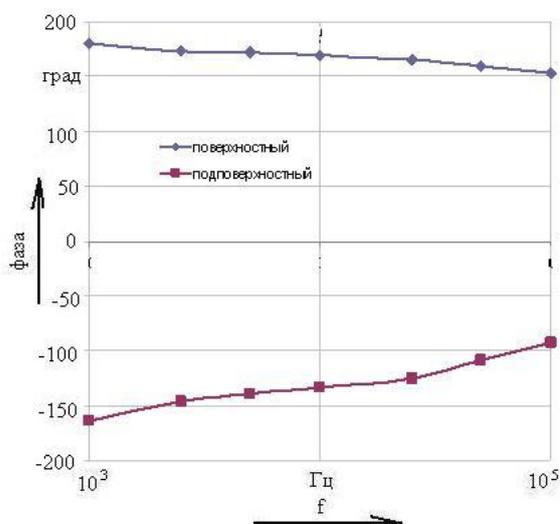


Рисунок 4 – Зависимость фазы $U_{вн}^*$ от частоты при размещении ВТП над центром глухого отверстия глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм с зазором $Z_p = 1$ мм при $H = 6$ кА/м

Приведенные на рисунке 4 зависимости показывают, что фаза вносимого напряжения для поверхностного и подповерхностного объемных дефектов существенно отличаются, монотонно и незначительно изменяясь с увеличением величины f . При этом на частоте 50 КГц разность фаз от поверхностного и подповерхностного дефектов составляет около 270° , т.е. имеет место ортогональность соответствующих векторов от информативного и мешающего параметров. Это позволяет эффективно использовать амплитудно-фазовый метод для повышения отношения сигнал/помеха при выявлении коррозионных поражений с тыльной стороны.

На рисунках 5, 6 приведены зависимости $U_{\text{вн}}^* = U_{\text{вн}}^*(X)$ в диапазоне частот для $H = 9$ кА/м при перемещении ВТП над поверхностным и подповерхностным глухими отверстиями, соответственно, с одинаковыми глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм. ВТП перемещался через центр отверстий по оси X , совпадающей с осью намагничивания. Так как функция $U_{\text{вн}}^* = U_{\text{вн}}^*(X)$ симметрична, на графиках показаны только значения для $X \leq 0$. Из приведенных графиков следует, что характер функции $U_{\text{вн}}^*(X)$ при взаимодействии с поверхностным дефектом существенно зависит от величины f . При $f = 1$ КГц функция $U_{\text{вн}}^*(X)$ имеет максимум над центром дефекта и монотонно изменяется. При этом зона влияния дефекта составляет около 5 мм от его центра. С увеличением частоты появляются и растут дополнительные локальные экстремумы, смещенный относительно оси отверстия на $\pm (4 \dots 6)$ мм. При этом максимум $U_{\text{вн}}^*$ при $X=0$ непрерывно уменьшается и при $f \geq 50$ КГц становится меньше дополнительных локальных максимумов.

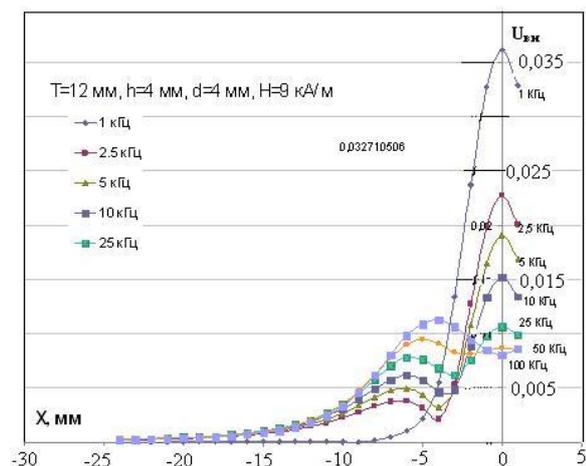


Рисунок 5 – Зависимость $U_{\text{вн}}^* = U_{\text{вн}}^*(X)$ в диапазоне частот для $H=9$ кА/м при перемещении ВТП над поверхностным дефектом в виде глухого цилиндрического отверстия с глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм

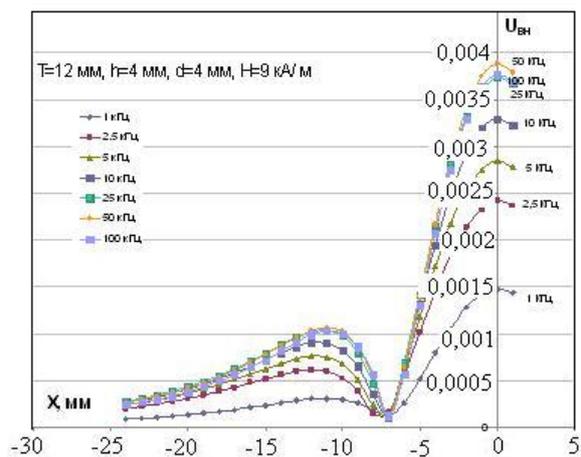
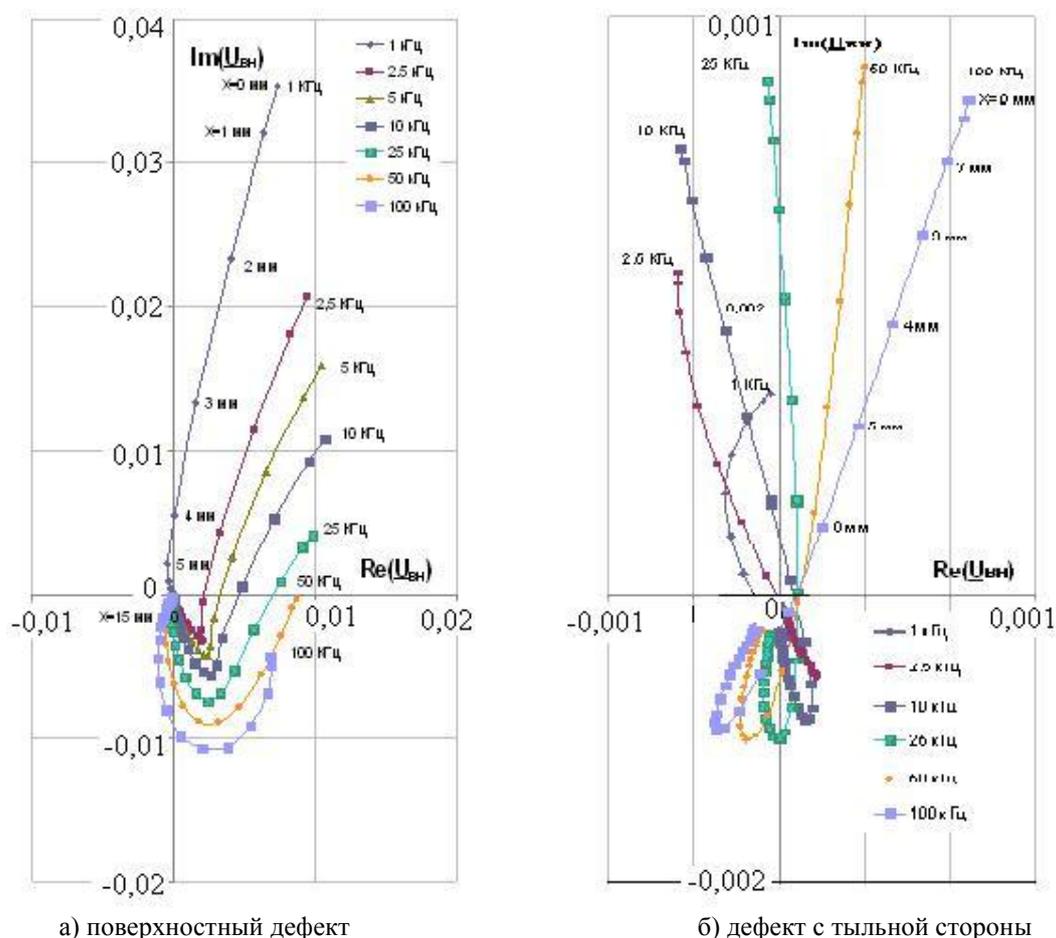


Рисунок 6 – Зависимость $U_{\text{вн}}^* = U_{\text{вн}}^*(X)$ в диапазоне частот для $H=9$ кА/м при перемещении ВТП над подповерхностным дефектом в виде глухого цилиндрического отверстия с глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм



а) поверхностный дефект
 б) дефект с тыльной стороны
Рисунок 7— Годографы $U_{вн}^* = U_{вн}^*(X, f)$ для $H=9$ кА/м при перемещении ВТП над дефектом в виде глухого цилиндрического отверстия с глубиной $h=4$ мм и диаметром $d=4$ мм

Функция $U_{вн}^* = U_{вн}^*(X)$, рассчитанная для глухого отверстия с тыльной стороны имеет основной и дополнительный экстремумы во всем исследуемом частотном диапазоне. При этом экстремумы, смещенные относительно оси отверстия в несколько раз меньше глобального экстремума $U_{вн}^*$, наблюдаемого над центром дефекта на любой из частот. Более наглядно изменение $U_{вн}^*(X)$ при взаимодействии с объемными дефектами можно наблюдать по годографам, приведенным на рисунке 7.

На рисунке 8 показаны зависимости $U_{вн}^*$ при $f = 50$ КГц от глубины поверхностного и подповерхностного дефектов при размещении ВТП над их центром для $Z_p=1$ мм и $H=6$ кА/м. Полученные зависимости показывают, что при изменении глубины поверхностного дефекта амплитуда $U_{вн}^*$ перестает заметно изменяться при $h \geq 1$ мм. При увеличении глубины подповерхностного дефекта до 6 мм наблюдается практически линейный закон изменения $U_{вн}^*$.

На рисунке 9 приведены зависимости $U_{вн}^*$ от зазора при размещении ВТП над центром поверхностного и подповерхностного объемного дефектов глубиной $h = 4$ мм и диаметром $d = 4$ мм в пластине $T = 12$ мм при $H = 6$ кА/м. Зависимости носят экспоненциальный характер. При этом степень ослабления сигнала с увеличением Z_p для поверхностного дефекта большая, чем для подповерхностного. Рассчитанные годографы $U_{вн}^* = U_{вн}^*(Z_p)$ показали незначительное изменение фазы $U_{вн}^*$ обоих типов дефектов при изменении зазора (рисунок 10).

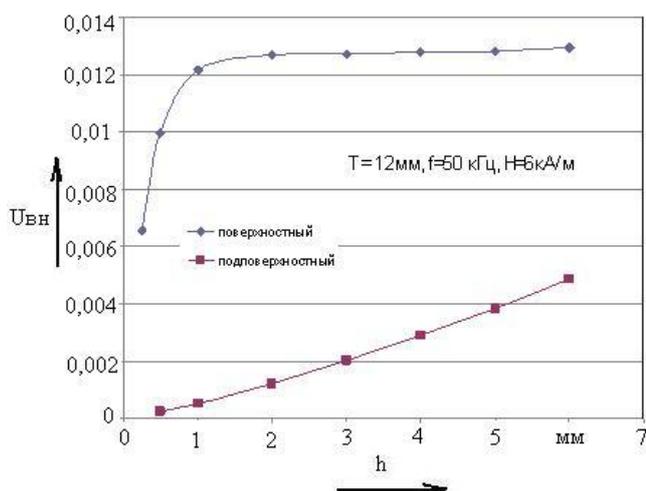


Рисунок 8 – Зависимость нормированной амплитуды $U_{вн}^*$ от глубины глухого отверстия диаметром $d = 4\text{ мм}$ при размещении ВТП над ее центром: $T = 12\text{ мм}$, $H = 6\text{ кА/м}$, $Z_p = 1\text{ мм}$

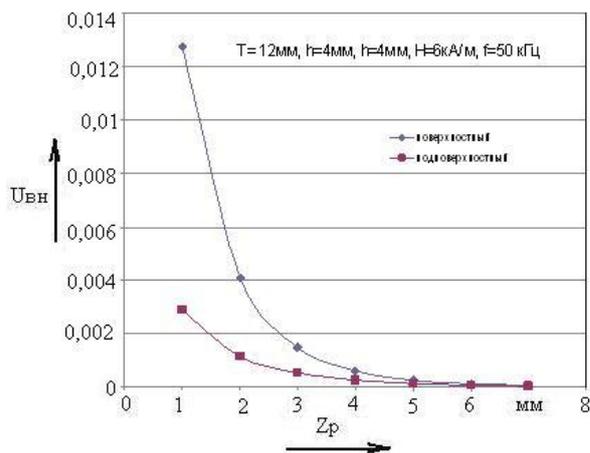


Рисунок 9 – Зависимость нормированной амплитуды $U_{вн}^*$ от зазора при размещении ВТП над центром глухого отверстия глубиной $h=4\text{ мм}$ и диаметром $d = 4\text{ мм}$ в пластине $T = 12\text{ мм}$ при $H = 6\text{ кА/м}$

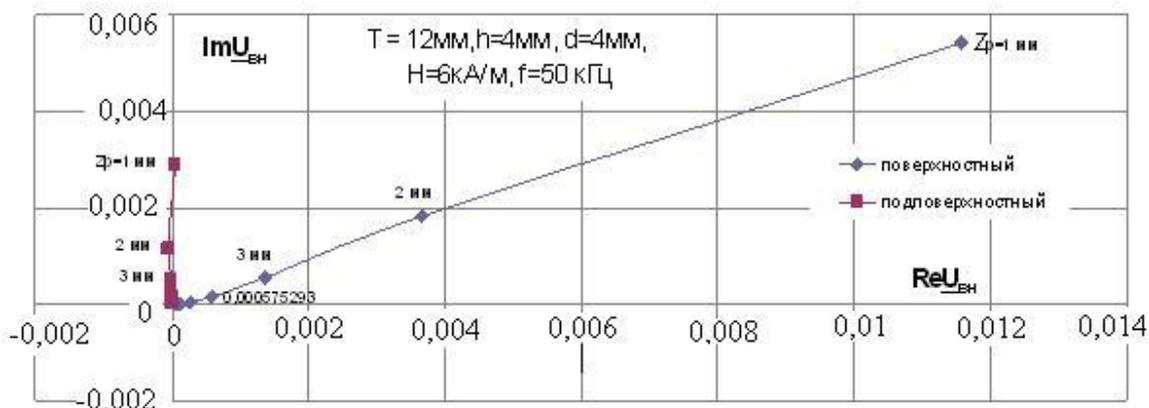


Рисунок 10 – Годограф $U_{вн}^*$ от зазора при размещении ВТП над центром глухого отверстия глубиной $h = 4\text{ мм}$ и диаметром $d = 4\text{ мм}$ в пластине при $T=12\text{ мм}$, $H = 6\text{ кА/м}$

Результаты выполненных расчетов проверялись экспериментально и нашли свое подтверждение. Полученные закономерности взаимодействия с объемными дефектами при комбинированной вихретоко-магнитной дефектоскопии позволяют повысить эффективность проектирования соответствующих средств оценки коррозионного состояния объектов из ферромагнитных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля./В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин – М.: Машиностроение, 2004.– С. 96-98.
2. Ефимов, А.Г. Экспериментальное исследование преимуществ применения мультиспектрального контроля с использованием вихретокового дефектоскопа ВД-90НП / А.Г. Ефимов // Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. - Нижний Новгород. – 2008. - С. 16.
3. Кифер, И.И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер. - М.: Энергия, 1969. - 360 с.

Клюев С.В.

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Кандидат технических наук, докторант кафедры "Метрология, сертификация и диагностика"

Шкатов Петр Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Доктор технических наук, профессор, директор НУЦ «КАСКАД», г. Москва
E-mail: petr_shkatov@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В статье описана математическая модель, разработанная для моделирования электромагнитных процессов при вихретоковой дефектоскопии бурильной трубы из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: *вихретоковый контроль, дефектоскопия, бурильная труба, коррозия, трещина.*

In article are describe Mathematical model, developed for modeling of electromagnetic processes at eddy current testing of light alloy drill pipes.

Key words: *eddy current testing, nondestructive testing, drill pipe, corrosion, crack.*

В настоящее время в глубоком бурении наиболее эффективными методами неразрушающего контроля бурильных труб и легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), в частности, являются ультразвуковой и вихретоковый методы.

Легкосплавные бурильные трубы имеют сборную конструкцию. Тело трубы из алюминиевого сплава соединено с замковыми стальными деталями (ниппелем или муфтой) с помощью трубной резьбы [1]. Наиболее распространены легкосплавные трубы повышенной надежности (ЛБТПН) из алюминиевых сплавов 1953Т1 и Д16Т со стальными замками ЗЛКА-178 (рисунок 1). Легкосплавные бурильные трубы собраны с замковыми деталями с помощью трубной трапецеидальной резьбы ТТ138Х5,08Х1:32 по ГОСТ 5286-75. Данное соединение трубы с замком неразъемное и должно работать в течение всего срока службы бурильной трубы [2].



Рисунок 1 – Фрагмент легкосплавной бурильной трубы повышенной надежности

Принципиальным отличием ЛБТПН от серийных ЛБТ является способ соединения трубы с замком на упорной трапецеидальной резьбе с коническим стабилизирующим пояском.

Своевременный контроль технического состояния бурильных труб и в частности ЛБТ позволяет выявить коррозионные и эрозионные повреждения, каверны, усталостные трещины и абразивный износ, оценить характер этих нарушений. На основе полученной информации принимается обоснованное решение о возможности дальнейшей эксплуатации, необходимости ремонта или списания проконтролированной трубы.

В настоящее время актуально создание средств контроля, позволяющих выявлять различные дефекты, измерять толщину стенки трубы без подъема труб из скважин, глубина которых составляет от 3 до 5 км.

Для неразъемного соединения характерны поперечно-ориентированные усталостные дефекты, развивающиеся под действием знакопеременных изгибающих нагрузок. Излом обычно происходит по первому-пятому виткам трубной резьбы и в зоне конического стабилизирующего пояса, находящимся в сопряжении с бурильным замком. По данным об авариях при бурении с использованием алюминиевых труб излом по резьбе вследствие усталостного разрушения составляет около 6 % от общего числа аварий. Поскольку каждый дефект может привести к аварийной ситуации, очевидна важность обеспечения надежного и достоверного контроля трубной резьбы. В то же время, следует учитывать, что зоны трубной резьбы и стабилизирующего пояса – крайне неудобный объект для контроля из-за малой

конусности и из-за того, что высота профиля резьбы (около 2 мм) соизмерима с глубиной трещины, подлежащей выявлению. Кроме того, трубная резьба перекрыта замковой деталью, находящейся с ней в сопряжении.

Без надлежащего контроля данного неразъемного соединения развитие данного рода дефекта может привести к слому бурильной трубы, чреватого огромными материальными потерями. В работе [3] описана разработанная технология ультразвукового контроля неразъемного соединения ЛБТПН.

Для дефектоскопии основного тела ЛБТ без их извлечения из скважин применение ультразвукового метода практически невозможно. Это связано со сложностью обеспечения акустического контакта при сканировании. Вихретоковый метод – бесконтактный, однако при применении традиционных вихретоковых преобразователей (ВТП) с соосными возбуждающей и измерительной обмотками глубина контроля невелика. Это неприемлемо, так как толщина трубы составляет от 10 до 14 мм, а опасные дефекты в виде трещин и коррозионных поражений, как правило, развиваются со стороны трубы.

Предварительно проведенные эксперименты показали, что информация о наличии дефектов может быть получена путем измерения реакции вихревых токов измерительной катушкой, размещенной во внутренней полости контролируемой трубы, так, чтобы ее ось была перпендикулярна контролируемому участку. При этом возбуждающая катушка размещается соосно с трубой и смещается относительно измерительной катушки на величину X . При такой схеме контроля достигается ослабление влияния скин-эффекта. При ее практической реализации потребуется сканирование измерительной катушки по угловой координате. Сканирование целесообразно заменить использованием матрицы измерительных катушек, что схематично показано на рисунке 2.

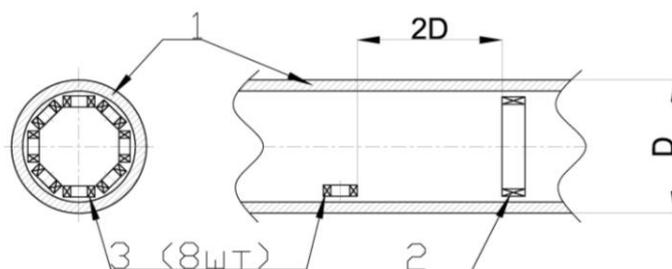


Рисунок 2 – Схема контроля с использованием матрицы измерительных катушек: 1 – контролируемая труба, 2 – возбуждающая катушка, 3 – измерительные катушки

Для выбранной схемы контроля необходимо определить рабочую частоту f , расстояние X между возбуждающей и измерительной катушками, размеры обеих катушек. Размеры возбуждающей катушки выбираются из конструктивных соображений.

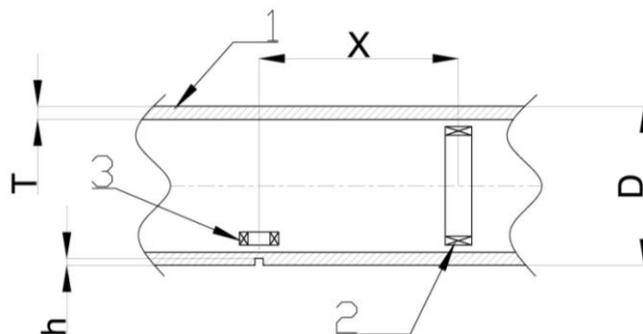
Внешний диаметр измерительной катушки выбирается так, чтобы, с одной стороны, обеспечить максимально возможную ее электромагнитную связь с металлом катушки, а с другой стороны, обеспечить ее свободное перемещение вдоль оси трубы. Как показывает опыт, для свободного перемещения ВТП во внутренней полости трубы коэффициент заполнения $\eta = (D_{вт} / D_{ВТП})^2$ должен составлять величину не более 0,7...0,8.

Логично измерительные катушки 3 разместить так, чтобы их внешний торец находился от оси ВТП на расстоянии, равном внешнему диаметру возбуждающей катушки. Диаметр измерительных катушек должен определяться в соответствии с зоной искажения электромагнитного поля, возникающей под влиянием дефектов.

Для определения оптимизируемых параметров и получения выходных характеристик ВТП исследовались искажения электромагнитного поля, обусловленные наличием дефектов типа трещин и коррозионных поражений, развивающихся как с внутренней, так и наружной поверхностей.

Расчеты проводились для трубы из сплава Д16Т с наружным диаметром $D = 145$ мм и толщиной стенки $T = 10$ мм.

На рисунке 3 представлена расчетная геометрическая модель, включающая контролируемый объект 1, возбуждающую катушку 2 и измерительную катушку 3. Ось измерительной катушки 3 размещена на расстоянии X от плоскости возбуждающей катушки. Возбуждающая катушка, исходя из необходимого значения η имела наружный диаметр $D_{кн} = 100$ мм. Ее внутренний диаметр $D_{кв}$ был выбран равным 90 мм, а ее длина $L_k = 10$ мм. Рассматривалось влияние в теле трубы дефектов с ее наружной или внутренней стороны. Дефекты имитировались кольцевой проточкой с длиной $\ell = 15$ мм и глубиной h (двумерная модель) и продольной трещиной (трехмерная модель) с длиной ℓ и глубиной h . В процессе расчетов варьировались: тип дефектов, их глубина h , расстояние X между катушками, рабочая частота f .



**Рисунок 3 – Геометрическая расчетная модель:
1 – контролируемый объект, 2 – возбуждающая катушка,
3 – измерительная катушка**

Расчеты проводились методом конечных элементов на базе программного пакета ANSYS. В процессе расчетов в диапазоне частот f вычислялось изменение радиальной составляющей H_r напряженности магнитного поля во внутренней и внешней полостях трубы под влиянием моделей дефектов. Распределение H_r позволяет получить наиболее полную информацию о зоне искажения электромагнитного поля, что необходимо для выбора размеров измерительной катушки. Вычисления проводились для точек с радиальной координатой $r=50$ мм, что соответствует внешнему радиусу возбуждающей катушки. При этом расстояние от точки наблюдения до поверхности трубы (рабочий зазор) составляло 12,5 мм.

В процессе вычислений определялась разность напряженностей

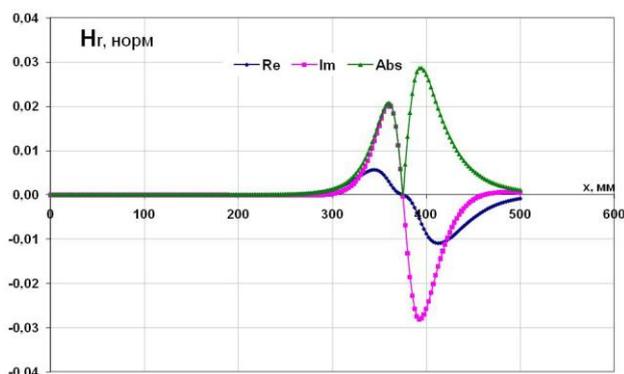
$$H_r = H_{рд} - H_{рс}, \quad (1)$$

где $H_{рд}$ и $H_{рс}$ – напряженности магнитного поля при наличии и отсутствии дефекта, соответственно.

Затем, для обобщения полученных результатов, полученная величина H_r нормировалась по модулю H_{r0} , соответствующему величине H_r при отсутствии контролируемого объекта (режим холостого хода). Таким образом, для анализа вычислялась безразмерная величина $H_r^* = H_r / H_{r0}$.

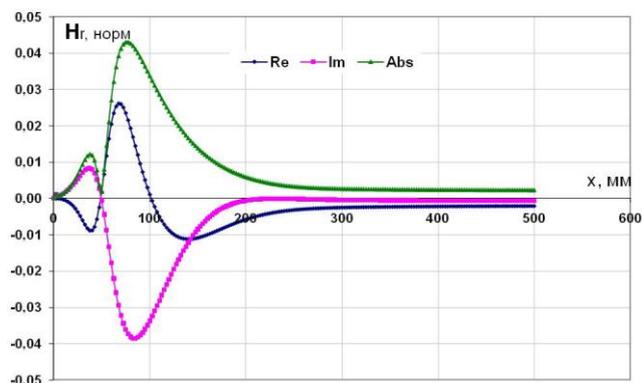
На рисунках 4 и 5 приведены характерные функции изменения действительной и мнимой составляющих H_r^* , а также ее модуля при перемещении ВТП вдоль трубы с наружной кольцевой проточкой глубиной $h = 5$ мм и длиной $\ell = 15$ мм при рабочей частоте $f = 50$ Гц. На рисунке 4 расстояние X между катушками 2 и 3 составляет 375 мм, а на рисунке 5 – 50 мм. Из рисунков видно, что с увеличением X чувствительность к дефекту падает. Однако наилучшие условия контроля будут достигнуты при выравнивании чувствительностей к дефектам, развивающимся со стороны внешней и стороны внутренней поверхностей трубы. При неблагоприятном соотношении чувствительность к дефектам с внутренней стороны трубы существенно превышает чувствительность к дефектам с

наружной стороны. При этом незначительные повреждения внутренней поверхности трубы создают фон, маскирующий изменения поля под влиянием опасных дефектов с наружной стороны трубы.



Re – действительной, Im – мнимой и Abs – модуля, $f=50$ Гц, расстояние между катушками $X=375$ мм

Рисунок 4 – Изменение под действием наружной кольцевой проточки глубиной $h = 5$ мм и длиной $l = 15$ мм компонент радиальной составляющей напряженности магнитного поля \underline{H}_r



Re – действительной, Im – мнимой и Abs – модуля, $f=50$ Гц, расстояние между катушками $X=50$ мм

Рисунок 5 – Изменение под действием наружной кольцевой проточки глубиной $h = 5$ мм и длиной $l = 15$ мм компонент радиальной составляющей напряженности магнитного поля \underline{H}_r

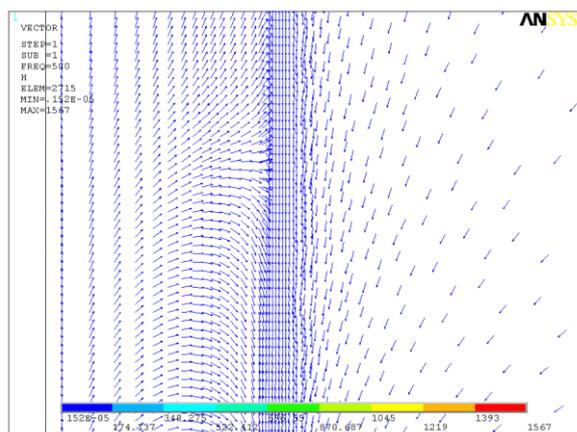
Было установлено, что отношение сигналов от аналогичных по размерам внутренних и наружных дефектов типа проточек зависит как от величины X , так и от величины f . При этом выравнивание чувствительностей происходит в том случае, когда в зоне контроля направление силовых линий \underline{H} возбуждающего магнитного поля становится перпендикулярным к поверхности контролируемого участка трубы.

Данный эффект наблюдается при рабочей частоте $500 \text{ Гц} \leq f \leq 2000 \text{ Гц}$ и смещении зоны контроля от центра возбуждающей катушки на величину $X \geq 2D$. При этом отношение модулей плотности тока J_n/J_v на наружной и внутренней поверхностях трубы приближается к максимуму. Это создает предпосылки для равновероятного выявления коррозионных поражений и трещин, как на наружной, так и внутренней поверхностях трубы. Обнаруженный эффект демонстрируется рисунке 6, где показана ориентация векторов напряженности возбуждающего магнитного поля \underline{H} при расстоянии между катушками $X = 375$ мм на рабочих частотах $f = 500$ Гц и $f = 100$ Гц. Видно, что при частоте $f = 100$ Гц данный эффект не наблюдается, в то время, как при $f = 500$ Гц линии \underline{H} ортогональны стенке трубы в зоне контроля.

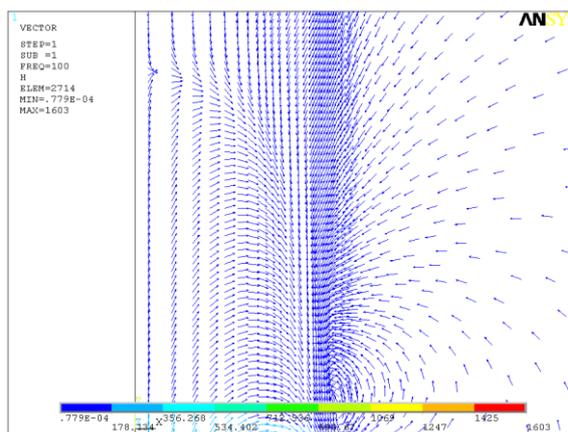
На рисунках 7, 8 показано отношение максимумов сигналов от дефектов типа кольцевых проточек на наружной и внутренней поверхностях трубы. Приведенные зависимости показывают, что на частоте $f = 500$ Гц с увеличением расстояния X от возбуждающей катушки до зоны контроля отношение $N = H_{\text{max}, n} / H_{\text{max}, вн}$ монотонно растет вплоть до $X = 200$ мм, а затем стабилизируется.

При рабочей частоте $f=2000$ Гц наблюдается экстремум N при $X=300$ мм. При этом величина N даже превышает 1, т.е. дефект с наружной поверхности трубы выявляется лучше, чем с внутренней.

Путем математического моделирования проводилась оценка влияния неровности поверхности на выявляемость дефектов. Шероховатость поверхности имитировалась гребенкой с высотой выступов 0,5 мм на внешней поверхности и высотой 1 мм на внутренней поверхности с шагом 5 мм. Расчеты показали, что такого рода неровности не влияют на выявляемость дефектов типа трещин глубиной 1 мм на обеих поверхностях.



а)



б)

Рисунок 6 – Ориентация векторов напряженности возбуждающего магнитного поля H при расстоянии между катушками $X=375$ мм на рабочих частотах при $f = 500$ Гц (а) и $f = 100$ Гц (б)

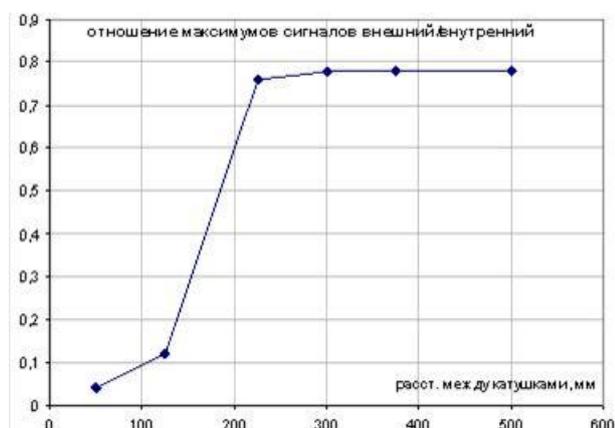


Рисунок 7 – Отношение максимумов сигналов внешний/внутренний от дефектов типа кольцевых проточек глубиной $h = 1$ мм и длиной $l = 15$ мм при частоте 500 Гц

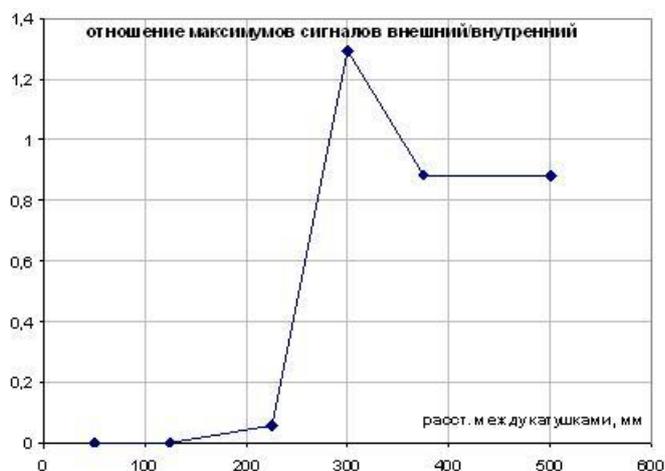


Рисунок 8 – Отношение максимумов сигналов внешний/внутренний от дефектов типа кольцевых проточек глубиной $h = 1$ мм и длиной $l = 15$ мм при частоте 2000 Гц

На основе выполненных исследований разработан макет вихретокового дефектоскопа, испытанный в лабораторных условиях. Результаты испытаний подтвердили достоверность выполненных расчетов. Таким образом, вихретоковым методом по разработанной схеме контроля возможно выявление дефектов типа трещин и коррозионных поражений глубиной более 1 мм, развивающихся как с внутренней, так и с наружной поверхностей легкосплавных буровых труб.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Файн, Г.М. Нефтяные трубы из легких сплавов/ Файн Г.М., В.Ф.Штамбург С.М.Данелянц. –М.: “Недра” 1990.
- 2 ГОСТ 23786-79 Трубы буровые из алюминиевых сплавов. Технические условия.
- 3 Шкатов, П.Н. Прибор неразрушающего контроля для выявления дефектов типа "усталостная трещина" в неразъемном резьбовом соединении легкосплавной буровой трубы ультразвуковым методом [Текст] / П.Н. Шкатов, С.Р.Цомук, А.Л. Дамаскин, С.С. Куликов //Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.– Орел: ОрелГТУ. – 2009. – № 5. – С. 73-76.

Куликов Станислав Сергеевич
 МГУПИ, г. Москва
 Аспирант
 тел. (499) 268-76-94
 e-mail: Stasso@yandex.ru

Е.В. ПАХОЛКИН

О КОМПЛЕКСНОМ ИССЛЕДОВАНИИ АДГЕЗИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе представлено обоснование комплексных исследований фрикционного контакта. Применение двух диагностических параметров электрической группы обеспечивает новые применения электрических методов в трибомониторинге.

Ключевые слова: моделирование фрикционного контакта, трибомониторинг, электропараметрические методы, состояние поверхностного слоя.

In work the substantiation of complex probes of frictional contact piece is presented. Application of two diagnostic parameters of electric group provides new applications of electric methods in tribomonitoring.

Key words: modeling of frictional contact, tribomonitoring, electroparametrical methods, state of the surface layer.

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятым методом испытаний смазочных свойств жидких материалов является метод четырех шариков (использование четырехшариковой машины трения). При этом комплексную оценку качества масла производят по различным показателям, а именно: по силе трения, развивающейся во время испытания; по давлению, которое выдерживает смазочная пленка; по износу шариков и т. д. При этом известно, что непосредственную связь между результатами оценки смазочных свойств на машине трения и фактическими свойствами масел в реальных условиях применения установить не всегда возможно. Кроме того, названный метод испытаний, как и многие другие, не позволяет дифференцировать отдельные проявления смазывающего свойства масла, так как это свойство является комплексным и базируется на таких понятиях, как противоизносные, противозадирные, антифрикционные свойства, а также смазывающая и несущая способность.

В рамках электрических методов неразрушающего контроля может быть предложено два основных метода исследования смазывающей способности масел.

Первый подход, описанный в работах [1 – 4], связан с исследованием параметров диэлектрической проницаемости. Теоретическими предпосылками для использования диэлькометрического метода в данном случае является связь эксплуатационных характеристик смазочных материалов с их химическим составом [2]. Решением задачи может являться установление эмпирических зависимостей между параметрами диэлектрической проницаемости и составом пробы смазочного материала. Кроме того, возможно применение модифицированного диэлькометрического метода, представляющего собой комбинацию собственно диэлькометрического метода и принципа разделения компонентов раствора, применяемого в жидкостной хроматографии.

Второе направление исследований смазывающей способности масел (адгезионных свойств) связано с применением электрорезистивного метода трибодиагностики.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Во многих узлах трения наблюдаются различные (переменные) режимы смазки, и при переходе к граничной смазке в трибосопряжении снижение трения и изнашивания определяется уже не реологическими свойствами масла. Граничное смазывание заключается в образовании на трущихся поверхностях адсорбированной пленки масла толщиной порядка 0,1 мкм [5]. Способность масла образовывать масляную пленку зависит от типа базовой основы масла и от наличия в нем поверхностно-активных полярных молекул, которые адсорбируются на поверхности трения. Степень адсорбционной способности масел в данном

аспекте называют смазывающей способностью, кроме того, применяются также термины «маслянистость» и «липкость».

На рисунке 1 показана модель «третьего тела» (ТТ) [3], поясняющая предпосылки для использования параметров электрического сопротивления фрикционного контакта при экспериментальном исследовании ТТ, представленного адсорбированными поверхностными пленками смазочного материала.

В соответствии с приведенным рисунком ТТ представлено сопротивлениями:

$R_{см}$ – смазочного материала, разделяющего трущиеся металлические поверхности;

$R_{окс}$ – поверхностных неметаллических твердых слоев (окисных пленок, например);

$R_{м}$ – металлического контакта;

$R_{адг.сл.}$ – адгезионного смазочного слоя.

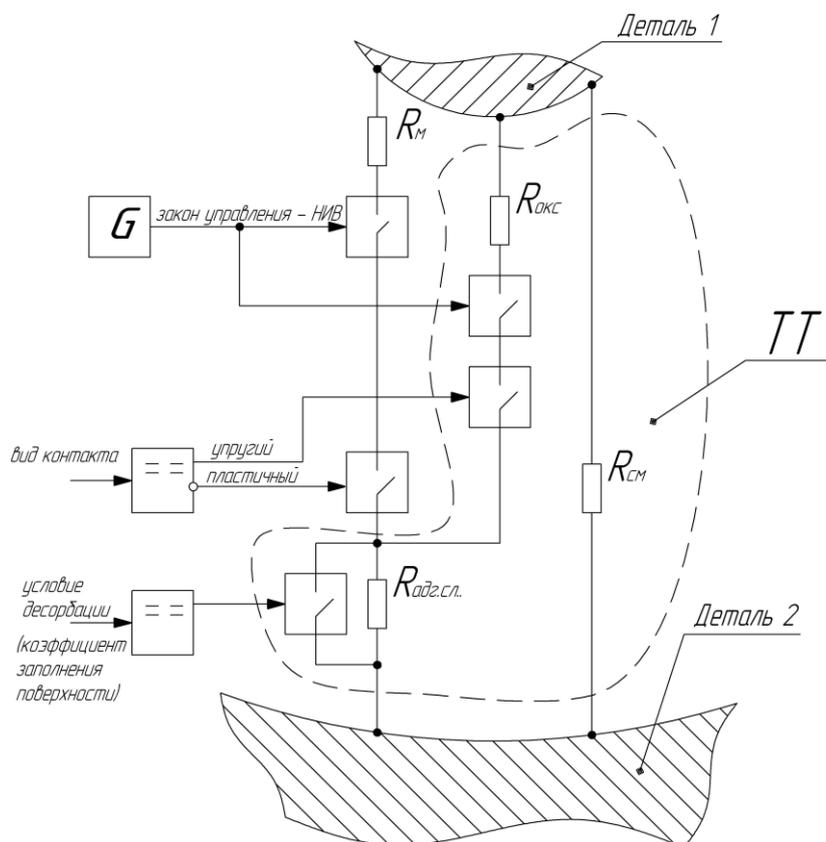


Рисунок 1 – К обоснованию применения электрорезистивного метода при исследовании адгезионных свойств смазочного материала

При работе трибосопряжения сопротивление $R_{см}$ в отдельные моменты времени механического разрушения смазочного слоя шунтируется сопротивлениями $R_{окс}$ и $R_{м}$. При этом последовательно с сопротивлениями металлического контакта и окисных пленок на рисунке 1 показано сопротивление $R_{адг.сл.}$.

Состояние электрической схемы замещения фрикционного контакта определяется условиями контактирования – тем, какие сопротивления оказываются «включенными».

Процессы микроконтактирования имитируются работой генератора G и управляемых им ключей, показанных на рисунке 1. Дополнительным условием для включения в цепь сопротивления $R_{окс}$ или $R_{м}$ является определение вида контакта: упругий или пластический. Существуют модели (Я.Н. Рудзита, Гринвуда и Вильямсона, И.В. Крагельского и др.), позволяющие оценить вероятность существования при трении пластического контакта (вероятность $K_{п}$) или упругого – $K_{у}$, причем $K_{п} = 1 - K_{у}$. При упругом контакте в цепь включается сопротивление $R_{окс}$, а при пластическом – $R_{м}$. Последнее можно пояснить рисунком 2.

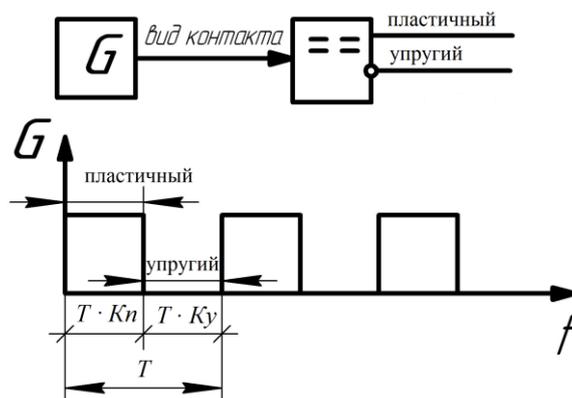


Рисунок 2 – Имитация изменения вида контакта во времени:
 K_n – вероятность существования пластического контакта;
 K_y – вероятность существования упругого контакта;
 T – времени исследования

Таким образом, считая процесс контактирования во времени стационарным, вероятность того или иного вида контакта по модели, показанной на рисунке 1, можно имитировать работой генератора на рисунке 2, скважность импульсов которого определяется названными вероятностями. За время измерения T в цепи ТТ (рисунок 1) оказываются включены сопротивления $R_{окс}$ и R_m на различные относительные интервалы времени, зависящие от вероятности вида контакта. Время пластического контакта определяется как $T \cdot K_n$, а время упругого – $T \cdot K_y$.

Работу цепи, управляющей шунтированием сопротивления $R_{адг.сл.}$ (рисунок 1), можно описать аналогично. Вводя понятие коэффициента K_ζ заполнения поверхности фрикционного контакта адсорбированной пленкой смазочного материала (также может быть описан на основе вероятностного подхода), цепь управления компаратором, шунтирующим сопротивление $R_{адг.сл.}$, также можно имитировать генератором, сигнал которого имеет управляемую скважность (определяемую коэффициентом K_ζ).

Общее сопротивление R электрической цепи (рисунок 1) без учета процессов контактирования поверхностей может быть описано выражением:

$$R = [(R_m \parallel R_{окс}) + R_{адг.сл.}] \parallel R_{см} \quad (1)$$

С учетом вероятности K контактирования, но без учета индивидуального вклада сопротивлений металлического контакта и неметаллических твердых слоев можно перейти к среднему сопротивлению:

$$R = [(R_m \cdot K \parallel R_{окс} \cdot K) + R_{адг.сл.}] + R_{см} \cdot (1 - K). \quad (2)$$

С учетом коэффициента (вероятности) адгезии:

$$R = [(R_m \cdot K \parallel R_{окс} \cdot K) + R_{адг.сл.} \cdot K_3] + R_{см} \cdot (1 - K). \quad (3)$$

С учетом вида контакта (пластический или упругий):

$$R = [K \cdot ((R_m \cdot K_n) + (R_{окс} \cdot K_y)) + R_{адг.сл.} \cdot K_3] + R_{см} \cdot (1 - K). \quad (4)$$

Анализ выражения (1) показывает, что при условиях контактирования, когда толщина смазочного слоя соизмерима с приведенной шероховатостью деталей трибосопряжения, значение сопротивления, рассчитанного по этой формуле, составляет доли Ом.

В качестве примера был рассмотрен процесс контактирования в приборном подшипнике с диаметром шариков 1 мм, с шероховатостью рабочих поверхностей 0,63 мкм. Приведенная скорость в трибосопряжении принята 2 м/с.

Был выполнен расчет основных характеристики фрикционного контакта, к которым относятся потенциальное количество контактирующих микронеровностей, вероятностное число контактирующих микронеровностей, значение деформационного сближения контактирующих

поверхностей, толщина смазочного слоя в зоне трения (определена по упрощенной формуле Ратнера), относительное фактическое сближение поверхностей (сближение, отнесенное к высоте микронеровностей) и вероятностная фактическая площадь контакта.

На рисунке 3 показана зависимость электрического сопротивления в зоне трения (шарик-кольцо) в зависимости от значения радиальной нагрузки как фактора, влияющего в существенной мере на параметры контакта.

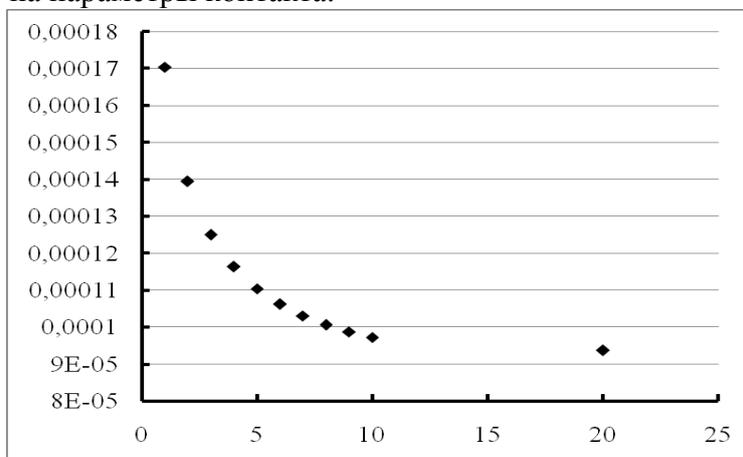


Рисунок 3 – Зависимость электрического сопротивления фрикционного контакта от нагрузки (по оси абсцисс – сила в Н, по оси ординат – сопротивление в Ом)

Сопоставление теоретических результатов, показанных на рисунке 3, и выражения (1) позволяет выявить противоречие: сопротивление фрикционного контакта, особенно при переходе к пластической деформации, должно быть очень малым, что не соответствует результатам экспериментальных исследований.

На рисунке 4 показан пример мониторинга электрического сопротивления подшипника, геометрические параметры которого соответствуют исходным данным описанного выше расчета. При этом каждая точка на рисунке 4 – это результат усреднения за 1 с при дискретизации боле 3 кГц.

Дополнительно проведенные измерения параметра НИВ [3] (в данной статье не приводятся) показали, что при выбранных условиях работы подшипника в нем формируется режим смазки, близкий к расчетным условиям, когда толщина смазочного слоя эквивалентна приведенной шероховатости.

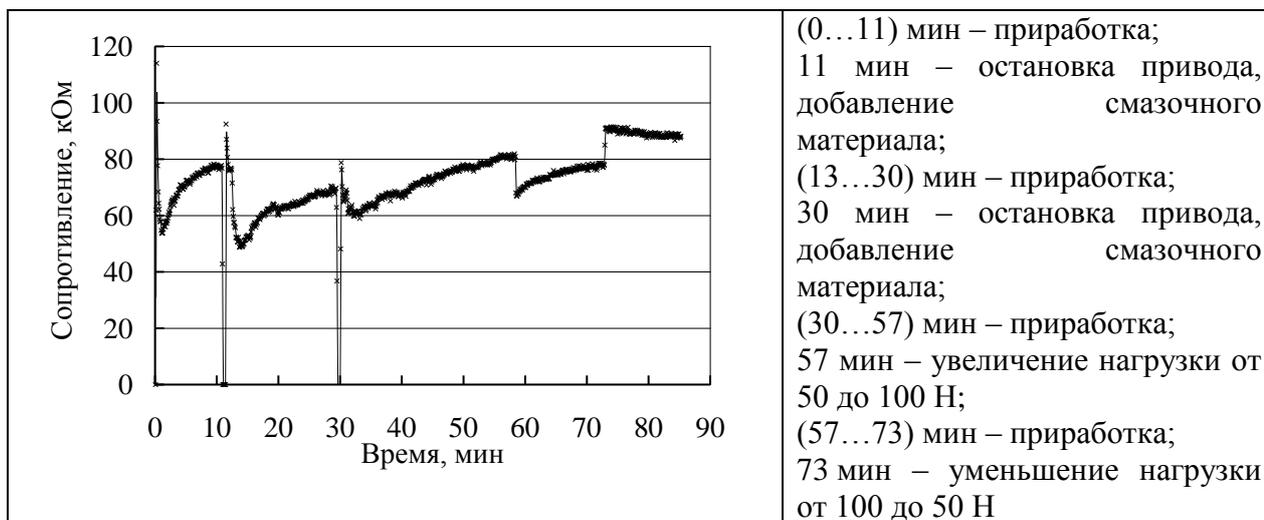


Рисунок 4 – Пример мониторинга электрического сопротивления подшипника 1000900 при различных режимах работы

Результаты теоретических исследований и выполненных экспериментов показали, что более корректным является переход к среднему сопротивлению с использованием выражения (4), которое учитывает вероятностный характер формирования электрического сопротивления в зоне трения при работе трибосопряжения, тогда как выражение (1) пригодно для исследования сопротивления трибосопряжения в статике.

Анализ работы трибосопряжения, таким образом, возможен при переходе к комплексной теоретической оценке состояния фрикционного контакта с применением двух диагностических параметров – электрического сопротивления и нормированного интегрального времени разрушения смазочного слоя, который является оценкой вероятности контактирования.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ

Анализ выражения (4) показывает, что исследование (одновременное) сопротивления R зоны трения и вероятности K микроконтактирования позволяет с учетом теоретической оценки вероятностей K_y и K_n установить значение параметра K_ζ , оценивающего адгезионную способность ТТ.

Другой эксперимент можно провести, имея значение K_ζ , найденное экспериментально другим методом, например, образцовым методом, базирующемся на теории жидкостной хроматографии [2, 4]. В этом случае исследование сопротивления R зоны трения и вероятности K микроконтактирования позволяет оценить вероятность K_n существования при трении пластического контакта или упругого – K_y , так как $K_n = 1 - K_y$, то есть в выражении (4) может быть оставлено одно неизвестное.

Необходимо отметить, что описанные экспериментальные исследования могут быть упрощены с точки зрения аппаратной реализации. Может быть выполнен переход от одновременного измерения параметров микроконтактирования и электрического сопротивления (требует наличия динамического цифрового омметра с широким частотным диапазоном, что сложно в реализации) к последовательному во времени измерению этих параметров. Условием такого упрощения является стационарность процесса трения в исследуемом интервале времени.

Предпосылками для идентификации адгезионных свойств ТТ, а также для идентификации вида контактирования и установления наличия ТТ в виде поверхностных твердых пленок является различие в проводимости компонентов ТТ, представленных на рисунке 1.

С ростом толщины пленки электрическое сопротивление возрастает и достигает значений свыше 10^6 Ом, а микроконтактирование шероховатых поверхностей в большинстве случаев сопровождается падением мгновенного значения сопротивления в подшипнике до $10^{-3} - 10^2$ Ом. Наличие окисных пленок повышает сопротивление контактной зоны на два-три порядка (по сравнению с пластическим контактом чистых металлических поверхностей).

Наличие адгезионного монослоя смазочного материала, наконец, приводит к дополнительному повышению электрического сопротивления, так как считается, что подобный слой обладает высокой электроизоляционной способностью.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали целесообразность перехода к комплексированию диагностических параметров, которое позволяет получить более адекватные результаты, представленные зависимостью электрического сопротивления фрикционного контакта от основных его характеристик и условий работы.

Дополнительное измерение параметра НИВ позволяет получить больше информации о состоянии трибосопряжения, при этом могут быть решены задачи, связанные с исследованием функционирования ТТ, а именно, задача оценки адгезионной способности

поверхностных смазочных слоев, а также задача исследования структуры рабочих поверхностей с целью выявления твердых неметаллических поверхностных слоев.

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)", код проекта 2.1.2/2075.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахолкин, Е.В. Теоретический анализ механизмов формирования смазывающих свойств масел с позиции их проявления в виде явлений электрической природы / Е.В. Пахолкин, Д.А. Кузьмичёв // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – №1 / 273 (559). – С. 83-90.
2. Сычев, С.Н. Исследование возможности и эффективности оценки адизионных свойств масел электрическим методом [Текст] /С.Н. Сычев, Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев, Д.А. Кузьмичев // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – №2 / 274 (560). – 2009. – С. 98-101.
3. Пахолкин, Е. В. Предпосылки использования методов электрического контроля при оценке состояния и функционирования в трибосопряжениях «третьего тела» [Текст] / Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - №4 / 276 (575). – 2009. – С. 116-121.
4. Сычев, С.Н. Моделирование процессов, связанных с функционированием смазочного материала и его деструкцией [Электронный ресурс] / С.Н. Сычев, В.К. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов: девятая сессия международной научной школы, 26 октября – 30 октября 2009 года, Санкт-Петербург; материалы школы; документы, программа, сборник докладов, презентация СПб и другие. – Мультимедий. информ. электрон. изд. – СПб.: ИПМаш РАН, 2009. – CD-R (1 ед.). - Систем. требования: Pentium 2; 64 Mb; Windows 9x/2000/XP; свободное место на диске 32 Mb; разрешение экрана 1024x768 при 32 bit; CD-ROM.
5. Моторные масла [Текст] / Р. Балтенас, А.С.Сафронов, А.И.Ушаков, В.Шергалес. – Москва-СПб.: Альфа-Лаб, 2000. -272 с.

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский Государственный Технический Университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 419876

E-mail: Eugene_P@bk.ru

УДК.681.58:620.92(063)

А.И. СУЗДАЛЬЦЕВ, С.П. ПЕТРОВ, Н.А. САФРОНОВА

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ РАЗНОРОДНЫМИ СВОЙСТВАМИ И ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

Представлен подход к оценке качества технических систем по обобщенному критерию, минимизирующего разнородные относительные показатели качества с учетом их групповых и внутригрупповых коэффициентов значимости.

Ключевые слова: техническая система, свойства, показатели качества, нормирование, обобщенный критерий, коэффициенты значимости, методы их определения.

The approach to quality definition of a technical system through a generalized criterion minimizing different relative quality coefficients taking into account their group and intra-group coefficients of significance is represented

Key words: technical system, quality coefficients, regulation, generalized criterion, significance factor, methods for their definition

Для оценки качества сложных технических и информационных систем, характеризующихся многими свойствами, разработаны методы многокритериальной оптимизации [1]. Однако, если свойства разнородные, то упомянутые методы не отвечают требованиям точности из-за нелинейной связи между показателями качества отдельных свойств. Одним из путей устранения нелинейности является нормирование единичных качественных показателей и сведение их к обобщенному критерию.

Нормирование позволяет сделать зависимость относительных показателей качества от их абсолютных значений линейной. При этом для формирования обобщенного критерия используется объединение нормированных единичных показателей в виде средневзвешенной арифметической функции (аддитивный обобщенный критерий), определяемый как K_A^0 [2]:

$$K_A^0 = \sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu} \cdot \delta_k, 0 \leq \sigma_{\mu} \leq 1, \quad (1)$$

или в виде средневзвешенной геометрической функции (мультипликативный обобщенный критерий), определяемый как K_G^0 :

$$K_G^0 = \prod_{\mu=1}^n \delta_k^{\sigma_{\mu}}, 0 < \sigma_{\mu} \leq 1, \quad (2)$$

где δ_k – относительное значение единичного показателя, характеризующего степень удовлетворения потребителей данным свойством, при этом:

$$\delta_k = \frac{\Delta k}{\Delta k_{\max}} - (\text{совокупность показателей следует сделать максимальной}) \quad (3)$$

$$\delta_k = 1 - \frac{\Delta k}{\Delta k_{\max}} - (\text{совокупность показателей следует сделать минимальной}), \quad (4)$$

где Δk и Δk_{\max} – абсолютное и максимальное значения единичного показателя;

σ_{μ} – весомость, определяющая важность данного свойства среди остальных,

причем $\sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu} = 1$

Среди упомянутых технических систем встречаются такие, которые характеризуются не только отдельными единичными свойствами, но и целыми группами разнородных единичных свойств со своими внутригрупповыми показателями качества. Например,

комбинированная система городского теплоснабжения (КСТ), структурно включающая в себя централизованное теплоснабжение от ТЭЦ и сотни отдельных тепловых источников, объединенных в единую сеть с многоконтурной системой управления тепловыми и гидравлическими режимами. Определение обобщенного показателя таких систем связано с трудностями не только с определением показателей δ_k , но и с определением значений весомости σ_μ как между групповыми показателями, так и между внутригрупповыми показателями.

В статье рассматривается метод определения обобщенного показателя качества усеченного варианта комбинированной системы теплоснабжения (КСТ), в основу которой положен аддитивный обобщенный критерий в виде функционала:

$$K^0 \Rightarrow \min K_A^0$$

Метод базируется на методологии анализа технических систем, основанной на теории квалиметрии, с использованием аддитивного метода объединения относительных разнородных показателей качества единичных свойств системы в обобщенный показатель оценки качества. Методология отличается от известных минимизацией целевой функции обобщенного показателя качества, а также использованием весовых коэффициентов и экспертных оценок для определения значимости единичных свойств системы, что соответствует математическому выражению:

$$\begin{cases} K^0 = \sum_1^r K_i \cdot \sigma_i \Rightarrow \min. \\ K_i = \sum_1^j K'_j \cdot g_j \vee \sum_1^m K_m^2 \cdot g_m \vee \dots \vee \sum_1^r K_n^r \cdot g_n, \end{cases} \quad (5)$$

где K^0 – обобщенный показатель (критерий) качества, численные значения которого находятся в пределах $0 < K^0 \leq 1$;

G_i – веса значимости групповых относительных показателей качества;

K_i – относительный групповой показатель качества i -той группы из множества r групп;

K'_j – относительные j -тые единичные показатели качества в первой группе;

g_j – веса значимости j -тых единичных показателей качества в первой группе;

K_m^2 – относительные m -тые единичные показатели качества во второй группе;

g_m – веса значимости m -тых единичных показателей качества во второй группе;

K_n^r – относительные r -тые единичные показатели качества в r -той группе;

g_n – веса значимости r -тых относительных единичных показателей качества в r -той группе;

\vee – знак логического «ИЛИ».

$i = 1 \dots r$; $j = 1, 2, \dots$; $m = 1, 2, \dots$; $n = 1, 2, \dots$; $i \neq j \neq m \neq n$; $0 < \sigma_i < 1$; $\sum \sigma_i = 1$;

$0 < g_j < 1$; $\sum g_j = 1$; $0 < g_m < 1$; $\sum g_m = 1$; $0 < g_n < 1$; $\sum g_n = 1$.

В рамках разработанной методологии анализа сформирована логическая модель оценки качества КСТ (рисунок 1). Модель имеет трехуровневую структуру. На нижнем (втором) уровне расположены относительные внутригрупповые показатели качества единичных групповых свойств, на первом уровне расположены относительные групповые показатели качества K_i^1 и на верхнем уровне - обобщенный критерий качества объекта исследования K^0 .

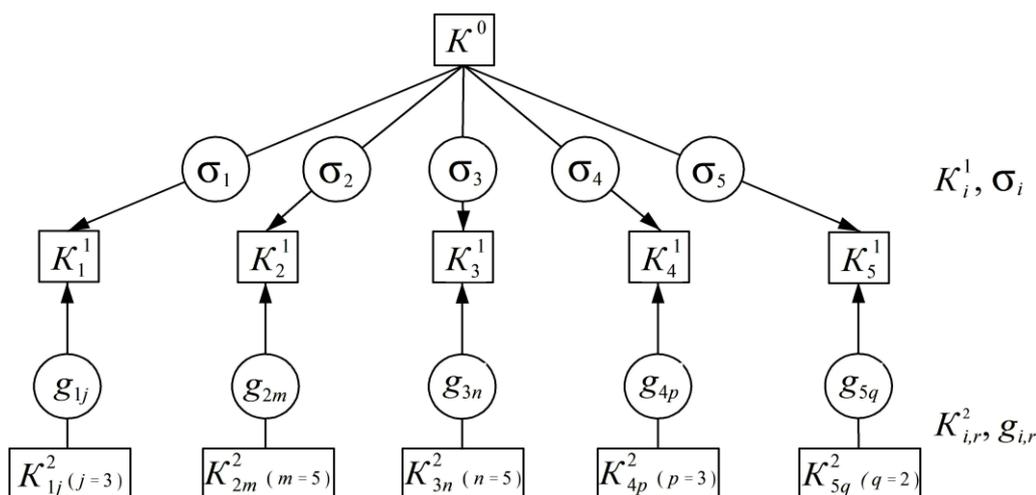


Рисунок 1 – Логическая модель оценки качества объекта исследования по обобщенному критерию (K^0)

Экспертной комиссией было определено 5 групп единичных свойств со своими показателями качества: температурными (j), энергетическими (m), динамическими (n), эксплуатационными (p) и патентно-правовыми (q). При этом в качестве критерия оптимизации принят функционал, минимизирующий обобщенный критерий качества:

$$\left\{ \begin{array}{l} K^0 = \sum_{i=1}^5 K_i^1 \cdot \sigma_i \Rightarrow \min; \\ K_i^1 = \sum_{j,m,n,p,q} K_{ij}^2 \cdot g_{ij}; K_1^1 = \sum_{j=1}^4 K_{1j}^2 \cdot g_{1j}; K_2^1 = \sum_{m=1}^5 K_{2m}^2 \cdot g_{2m}; \dots \\ 0 < \sigma_i < 1; \sum_{i=1}^5 \sigma_i = 1; 0 < g_{ir} < 1; \sum_{r=1}^r g_{ir} = 1; i = 1-5; j = 1-3; \\ m = 1-5; n = 1-5; p = 1-3; q = 1-2, \end{array} \right. \quad (6)$$

где σ_i – веса значимости показателя качества i -той группы, причем: $\sigma_1 = 0,3$; $\sigma_2 = 0,25$; $\sigma_3 = 0,2$; $\sigma_4 = 0,15$; $\sigma_5 = 0,1$;

g_{ij} – веса значимости j -того показателя качества внутри i -той группы, причем: $g_{11} = 0,3$; - $g_{12} = 0,3$; - $g_{13} = 0,4$; - $g_{21} = 0,3$; - $g_{22} = 0,2$; - $g_{23} = 0,25$; - $g_{24} = 0,15$; - $g_{25} = 0,1$; - $g_{31} = 0,3$; - $g_{32} = 0,25$; - $g_{33} = 0,25$; - $g_{34} = 0,1$; - $g_{35} = 0,1$.

Указанные веса значимости относительных показателей качества определялись путем статистической обработки ответов группы специалистов – экспертов из 10 человек при их многократных опросах до совпадения данных у не менее трех человек по каждому показателю. Это значение принималось в качестве веса значимости соответствующего показателя. При этом в окончательном варианте оценки весов значимости происходила их корректировка до выполнения условия $\sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu} = 1$ и $\sum g_{ij} = 1$.

Из 15 частных показателей для анализа были выбраны 8 показателей, приведенных в таблице 1 (первый столбец). Для определения отдельных показателей качества, в частности, величины отклонения температуры теплоносителя на входе потребителя (п.1.2 таблицы 1), величины отклонения температуры внутреннего воздуха у потребителя (п.1.3 таблицы 1), величины ТРЗ (п.3.1 таблицы 1), проведены предварительные экспериментальные исследования и получены следующие результаты: $\varepsilon_{T1} = 5,2^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon_{\text{ВН.1}} = 3,4^{\circ}\text{C}$; $\tau_1 = 3,5\text{ч}$.

Величина отклонения температуры теплоносителя на выходе из когенерационного источника (п.1.1 таблицы 1) соответствует расчетному значению $|\varepsilon_T| \leq 3^\circ \text{C}$. Средний удельный расход топлива (п.2.1 таблицы 1), рассчитанный по методике [3], составляет $R_{Г1} = 171 \text{ кг/Гкал}$ [4].

Таблица 1 – Массив единичных свойств и показателей качества объекта исследования

Наименование групп единичных свойств и их параметров	Обозначение параметра	Диапазон изменения параметра	Показатель качества нормативный (расчетный)	Показатель качества относительный	Весовая значимость показателей качества σ_i, g_{ij}
1 Температурные (<i>j</i>)	K_{1j}^2				$\sigma_1 = 0,3$
1.1 Температура теплоносителя на выходе КИ	$\theta_{\text{ВЫХ1}}^{\text{КИ}} (K_{11}^2)$	70 – 100 °С	$ \varepsilon_T \leq \pm 3^\circ \text{C}$	0,03	$g_{11} = 0,3$
1.2 Температура теплоносителя на входе потребителя	$\theta_{\text{ВХ1}}^{\text{П}} (K_{12}^2)$	70 – 95 °С	$ \varepsilon_{T1} \leq \pm 3^\circ \text{C}$	0,054	$g_{12} = 0,3$
1.3 Температура внутреннего воздуха у потребителя	$\theta_{\text{ВН1}} (K_{13}^2)$	20 ± 2 °С	$ \varepsilon_{\text{ВН1}} \leq \pm 2^\circ \text{C}$	0,155	$g_{13} = 0,4$
2 Энергетические (<i>m</i>)	K_{2m}^2				$\sigma_2 = 0,25$
2.1 Средний удельный расход топлива, кг / Гкал **	$R_{Г1} (K_{21}^2)$	153,5-174	174	0,982	$g_{21} = 0,3$
2.5 Интегральный показатель минимума энергозатрат	$F_1 (K_{25}^2)$	20 - 30	29,6	0,821	$g_{25} = 0,1$
3 Динамические (<i>n</i>)	K_{3n}^2				$\sigma_3 = 0,2$
3.1 Время транспортного запаздывания	$\tau_1 (K_{31}^2)$	0,4 – 4ч	4ч	0,875	$g_{31} = 0,3$
3.4 Динамическая погрешность	$\varepsilon_1 (K_{34}^2)$	$\varepsilon_T \leq \pm 3^\circ \text{C}$	3°С	0,967	$g_{34} = 0,1$
3.5 Интегральный квадратический показатель качества переходного процесса	$I_1 (K_{35}^2)$	30 - 45	41,6	0,952	$g_{35} = 0,1$

** Расчет выполнен для суммарной тепловой нагрузки ТГК-4 и 110 котельных г. Орла [3].

Единичные свойства (п.3.4 таблицы 1) и (п.3.5 таблицы 1), характеризующие энергетические и динамические показатели качества КСТ, определены с помощью разработанного авторами графо-параметрического метода [5]. Вычисленное значение обобщенного показателя качества по выражению (6) для данного примера с использованием данных столбцов 5,6 таблицы 1 составляет $K^0 = 0,211$. Так как функционал является минимизирующим, то чем меньше значение K^0 , тем показатели качества системы лучше. Применительно к рассматриваемой системе это означает, что чем меньше отклонения параметров от заданных, тем более качественнее и надежнее система.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: системный подход. Пер. с польск. – М.: МИР, 1981. – 456 с.
2. Воинов Б.С. Информационные технологии и системы: Монография, в 2 кн. Книга 1. Методология синтеза новых решений. – Н.Новгород: изд-во НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2001. – 404 с.
3. Петров, С.П. Методика расчета эксергетического КПД энергоблока с построением эксергетических диаграмм [Текст]/С.П. Петров, А.И. Суздальцев//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел: ОрелГТУ, 2009. - №5. – С. 87 - 92
4. Петров, С.П. Анализ и синтез системы управления процессом передачи тепловой энергии в когенерационной системе централизованного теплоснабжения [Текст]: монография/С.П. Петров, М.Н. Маяков; под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. А.И. Суздальцева – Орел: Издательский дом «Орлик и К», 2009. – 314 с.
5. Петров, С.П. Графо-параметрический метод оценки эффективности системы управления локальным контуром теплоснабжения с пиковой нагрузкой [Текст]/ С.П. Петров, А.И. Суздальцев//Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2008. - №2. – С. 76-83

Суздальцев Анатолий Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Адрес: Россия, 302020 г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

Тел.: (4862)419560

E-mail: suzdalcev_a_i@mail.ru,

Петров Сергей Петрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»

Адрес: 302028 г. Орёл ул. 7-го Ноября 10 кв.10,

тел.76-02-68

E-mail: solnce@rekom.ru

Сафронова Наталья Анатольевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел

ст. преподаватель кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Адрес: Россия, 302020 г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

Тел.: (4862)419560

E-mail: pteivs@ostu.ru,

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР В ЗОНАХ ТРЕНИЯ ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗЦА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

Рассмотрен термоэлектрический метод раздельного измерения температур в зонах трения режущего инструмента по его передней и задней поверхностям.

Ключевые слова: температура режущего инструмента; термоэлектрический метод измерения; температура передней поверхности резца; температура задней поверхности резца.

There is the thermoelectric method of measure through average temperature fore end back surface of cutter in its zone of friction.

Key words: temperature of cutter; the thermoelectric method; temperature fore surface of cutter; temperature back surface of cutter.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих случаях скорость резания при токарной обработке изделий ограничивается нагревом режущего инструмента, так как с повышением его температуры в зонах трения резца и изделия и режущей кромки инструмента твердость в области последней понижается. Нагрев передней поверхности резца происходит в результате скольжения по ней стружки, а нагрев задней поверхности из-за трения резца о поверхность обрабатываемого изделия. Для понижения температуры режущего инструмента используют охлаждающие жидкости, которые подают на переднюю и заднюю поверхности резца. Выбор способа и интенсивности подачи охлаждающей жидкости диктуется степенью нагрева рабочих поверхностей режущего инструмента. Поэтому знание температур на рабочих участках поверхностей инструмента необходимо для выбора рациональной схемы и интенсивности его охлаждения, а также для повышения скорости резания, т.е. повышения производительности обработки изделия.

Для определения температуры непосредственно в областях контактирования инструмента с изделием в процессе резания применяют термоэлектрический метод, при котором инструмент и изделие используются как электроды естественной термопары. По данным предварительной градуировки такой термопары и значению генерируемой термоэдс определяют некоторое усредненное значение температуры в зонах трения инструмента и изделия. Такой способ определения температуры не позволяет выяснить, какая из рабочих поверхностей инструмента нагревается сильнее, и, соответственно, не позволяет правильно распределить подачу охлаждающей жидкости на поверхности инструмента. Для решения поставленной задачи необходимо было разработать метода раздельного определения температур на задней и передней поверхностях инструмента.

МЕТОД РАЗДЕЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА

При разработке такого метода было учтено, что в процессе резания образуются две естественные термопары, одна из которых возникает в области контактирования стружки с передней поверхностью инструмента, а другая – в области контактирования изделия с инструментом, т.е. в области режущей кромки и задней поверхности инструмента. В этом случае естественные термопары оказываются соединенными параллельно. Эквивалентная электрическая схема для измерения суммарной термоэдс этих естественных термопар приведена на рисунке 1.

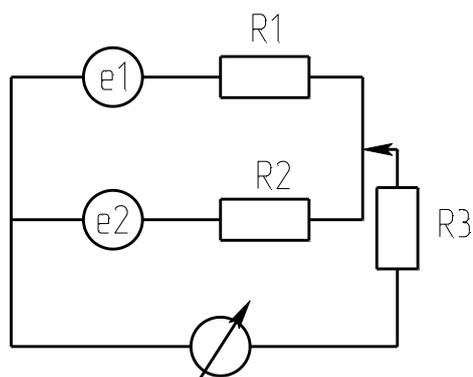


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема измерения напряжения, создаваемого термоэдс в цепях передней и задней поверхностей инструмента

На рисунке e1 и e2 – источники термоэдс E1 и E2, генерируемых соответственно в областях трения передней и задней поверхностей инструмента; R1 и R2 – сопротивления цепей естественных термопар; R3 – сопротивление измерительного прибора.

Для раздельного определения термоэдс E1 и E2 первоначально был разработан способ электрической изоляции передней поверхности инструмента от стружки. Для этой цели на переднюю поверхность инструмента наклеивалась изоляционная прокладка. Наклейка такой прокладки изменяла усилие трения стружки, однако это не вносило изменения в условия трения задней поверхности и, следовательно, не влияло на значение термоэдс E2. При этом эквивалентная электрическая схема принимала вид, приведенный на рисунке 2. Так как значение сопротивления R2 значительно меньше значения сопротивления цепи измерительного прибора R3, то с достаточной степенью точности можно считать, что измеряемое прибором напряжение практически равно E2.

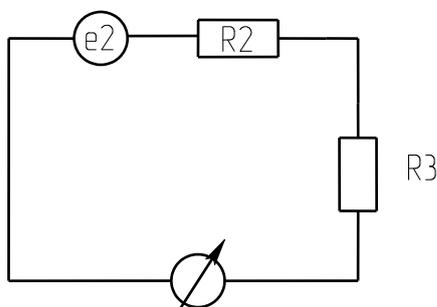


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема измерения термоэдс, генерируемой естественной термопарой в области режущей кромки и задней поверхности инструмента при изолированной передней поверхности

Напряжение U, создаваемое на приборе при использовании схемы, изображенной на рисунке 1, определяется по методу «узлового напряжения»:

$$U = \frac{E_1/R_1 + E_2/R_2}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3}. \quad (1)$$

Из приведенного выражения получена формула, позволяющая определить E1 (при выводе этой формулы значение сопротивления R3 не учитывалось, так как оно несравнимо больше сопротивлений R1 и R2):

$$E_1 = U \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) - E_2 \frac{R_1}{R_2}. \quad (2)$$

Для использования этой формулы при расчетах необходимо знать значения сопротивлений R_1 и R_2 или их отношение. Для определения последнего было использовано положение о том, что сопротивление контактирующей пары обратно пропорционально площади контакта [[1], т. е. $R_1/R_2 = S_2/S_1$, где S_1 и S_2 – соответственно площади контактирования стружки с передней поверхностью и изделия с задней поверхностью инструмента. Значения этих площадей были определены по следам областей трения и значению подачи. При выбранном режиме резания они составили $6,0 \text{ мм}^2$ и $1,25 \text{ мм}^2$, а их отношение – $0,21$. Это отношение площадей практически не изменялось при обработке сталей разных марок при одинаковых режимах резания (одинаковых диаметрах обрабатываемого изделия, глубине и скорости резания и подаче). Следует отметить, что реальное значение полученного отношения должно быть несколько меньше, так как к переходному сопротивлению контактирующей пары стружка – передняя поверхность инструмента последовательно присоединено сопротивление самой стружки.

При проведении эксперимента использовались резцы, изготовленные из быстрорежущей стали марки Р6М5. Составные резцы не использовались из-за возможного влияния дополнительных термопар, образующихся в областях припаивания твердосплавных пластин к корпусу резца. Перед началом исследований для естественных термопар изделие – режущая кромка резца снимались зависимости термоэдс от температуры нагрева области их контакта при температуре «холодных» концов изделия и резца 20^0 С . Полученные зависимости показали, что используемые резцы с изделием образуют практически идентичные термопары.

В процессе резания записывались значения термоэдс с помощью устройства ЛА-И241USB с аналого-цифровым преобразованием и частотой дискретизации 800 Гц при следующем режиме: глубина резания – $0,5 \text{ мм}$, подача – 0.14 мм/об , частота вращения – 500 об/мин , скорости резания – 75 м/ мин . Исследования проводились на станке «Кусон 3». Данные, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице 1.

После этого на резцах устанавливалась изоляционная прокладка, к которой были предъявлены следующие требования: высокие изоляционные свойства в диапазоне температур $10 - 300^0 \text{ С}$, слабая истираемость при трении стружки и отсутствие электризации при трении о стружку. В результате предварительных исследований для прокладки был выбран материал – электротехнический листовой стеклотекстолит толщиной $0,4 \text{ мм}$. Перед установкой прокладки на передней поверхности резца для того, чтобы не произошло нарушения режущего клина, была профрезерована канавка, расположенная параллельно режущей кромке на расстоянии $0,8 \text{ мм}$ от нее, глубиной 0.6 мм и шириной 4 мм . На дно канавки наносился слой клея марки 3M Scotch-Weld B210 толщиной 0.2 мм , на который накладывалась прокладка. Время затвердевания клея составляло 4 часа. Степень изоляции контролировалась мегомметром. Затем снова проводились измерения напряжений при том же режиме резания. Данные, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения напряжений и средние квадратические отклонения значений напряжений (СКО), полученные при обтачивании заготовок из сталей различных марок резцами с изоляцией передней поверхности резца и без нее

Марка стали	Без изоляции передней поверхности резца		С изоляцией передней поверхности резца	
	Напряжение, В	СКО, В	Напряжение, В	СКО, В
Сталь Ст. 3	0,00288	$8,67 \cdot 10^{-5}$	0,00215	$8,64 \cdot 10^{-5}$
Сталь 20	0,00305	$4,24 \cdot 10^{-5}$	0,00262	$8,99 \cdot 10^{-5}$
Сталь 45	0,00150	$2,75 \cdot 10^{-5}$	0,00313	$15,5 \cdot 10^{-5}$

Поскольку естественные термопары в зонах трения были составлены электродами из одних и тех же материалов, то их термоэлектрические чувствительности практически были одинаковы. Это позволило рассчитать отношение средних температур на передней T_1 и задней T_2 поверхностях инструмента, равное отношению термоэдс на этих же поверхностях. Следует подчеркнуть, что на эти отношения не влияет некоторая термоэлектрическая неидентичность резцов, поскольку для каждого исследуемого материала использовался один и тот же резец как при наличии изоляционной прокладки, так без нее. Значения полученных отношений температур приведены в таблице 2. Эти значения показывают, что при мягких сталях Ст3 или Сталь 20 сильнее нагревается передняя поверхность резца и на ее охлаждение следует обращать большее внимание, а при твердых материалах (Сталь 45) сильнее нагревается задняя поверхность. Это подтверждает и известный факт, что при обработке чугуна, т. е. при ломкой стружке передняя поверхность инструмента нагревается слабее задней.

Таблица 2 – Значения термоэдс E_1 и E_2 , генерируемых на рабочих участках режущего инструмента, и отношения температур

Марка исследуемого материала заготовки (с указанием твердости)	Напряжение U, В	Среднее значение термоэдс, генерируемой по задней поверхности E_2 , В	Рассчитанное значение термоэдс по передней поверхности E_1 , В	Отношение T_1/T_2
Сталь Ст3 (131 НВ)	0,00288	0,00215	0,00303	1,41
Сталь 20 (160НВ)	0,00305	0,00262	0,00314	1,20
Сталь 45 (197 НВ)	0,00150	0,00313	0,00117	0,37 $T_2/T_1=2,7$

Измерение твердости поверхностей изделий из разных марок стали (их значения приведены в таблице 2 рядом с названием марок) показало, что переход от более сильного нагрева передней поверхности к более сильному нагреву задней поверхности происходит при твердости поверхностного слоя изделия порядка 150-170 НВ. При повышенных значениях твердости передняя поверхность резца нагревается слабо. Конечно, при других режимах резания и геометрии инструмента значения этой области твердостей могут быть несколько сдвинуты. Так, например, при увеличении глубины резания и получении более толстой стружки усилие, сопровождающее трение стружки о переднюю поверхность, возрастает и, как следствие, повышается температура в зоне трения. Поэтому область указанных значений твердости поверхностного слоя изделия в этом случае сместится в направлении более высоких значений твердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хольм Р. Электрические контакты: пер. с англ. – М. Изд-во иностр. лит., 1961.- 464 с.

Бакурова Юлия Алексеевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Старший преподаватель Ливенского филиала

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: pms35@ostu.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравнивают по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Подписано в печать 21.12.2009 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,5.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.