

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Бржозовский Б.М., Захаров О.В. Оценка погрешности бесцентрового измерения отклонения от круглости	3
Ивкин Е.И., Сироткин И.А. Высокоинтенсивная направленная ультразвуковая очистка охлаждаемых лопаток турбины в процессе их производства и ремонтных операций	7
Захаров О.В. Моделирование образования погрешностей формы заготовок при бесцентровом суперфинишировании	11

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Юдин А.В., Лобацевич К.Л. Беспоисковая адаптивная система стабилизации скорости кристаллизации монокристаллов	16
Савиных А.Б., Стешина Л.А., Буканова Т.С. Оптимизационная концепция синтеза современных элементов управления на основе электроприводов	20
Лопух Д.Б., Вавилов А.В., Мартынов А.П., Роуч Дж., Ричардсон Дж. Современные инструменты для исследования индукционной плавки в холодном тигле	24
Полянский Ю.В., Евсеев А.Н., Емелин С.В. Модель поведения концентрации механических примесей при движении смазочно-охлаждающей жидкости	32
Веремей Е.И. Алгоритм подхода к редукции гармонических возмущений	34

ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

Cisco обязуется поддержать устойчивое развитие российской программы технологических инноваций рассчитанными на несколько лет инвестициями в размере одного млрд. долларов	43
Оргкомитет «Expriority'2010» начал работу	45
На Autodesk Форуме рассказали, как надо проектировать	47

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов	48
-----------------------------	----

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Brzhozovskiy B.M., Zakharov O.V. Centerless measurement error valuation of the deflection from roundness	3
Ivkin E.I., Sirotkin I.A. High intensive directed ultrasonic cleaning of the cooled turbine blades in the production process and repair operations	7
Zakharov O.V. Blank shapes fault formation modeling for centerless superfinishing	11

MODERN TECHNOLOGIES

Yudin A.V., Lobatsevich K.L. Searchless adaptive system for stabilization rate of the single crystal crystallization	16
Savinykh A.B., Steshina L.A., Bukanova T.S. Synthesis optimization concept of the contemporary control elements on the basis of electric drive	20
Lopukh D.B., Vavilov A.V., Martynov A.P., Rouch Dzh., Pichardson Dzh. Contemporary instruments for research of the induction melting in the cold crucible	24
Polyanskov Yu.V., Evseev A.N., Emelin S.V. Behavior model of the mechanical admixtures concentration for coolant movement	32
Veremey E.I. Algorithm of the approach to harmonious disturbance reduction	34

EXHIBITION AND PRESENTATIONS

Cisco undertakes to support steady development of the Russian technological innovations programmer through the use of a calculated for several years investment on a scale 1×10^9 ...	43
Organizing committee «Expriority'2010» have began to work ...	45
There was being told how ought to design on the forum Autodesk	47

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review	48
--------------------------	----

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок (499) 269 6600, 269 5298

Художественный редактор *Галицына Т.Н.*
Компьютерный набор *Путилов В.Н.*
Компьютерная верстка *Тугаринов А.А.*

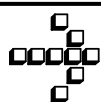
Сдано в набор 30.08.10. Подписано в печать 27.10.10.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч. изд. л. 6,9. Заказ 865. Цена свободная

Набрано в ФГУ «Научно-исследовательский институт —
Республиканский исследовательский
научно-консультационный центр экспертизы»
123995, Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13.Тел.: (499) 795 1789

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»
142110, Московская обл., г. Подольск,
ул. Кирова, 15

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

ООО «Издательство Машиностроение»,
«Автоматизация и современные технологии», 2010 г.



УДК 621.9:531.7

Б.М. Бржозовский, д-р техн. наук, проф., **О.В. Захаров**, канд. техн. наук, доц.
(Саратовский государственный технический университет)
zov17@mail.ru

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ БЕСЦЕНТРОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ КРУГЛОСТИ

Представлена математическая модель бесцентрового измерения отклонения от круглости, на основе которой дана оценка погрешности измерения, в том числе статистическим методом.

Ключевые слова: отклонение от круглости, бесцентровое измерение, погрешность измерения.

Mathematical model of the roundness deflection centerless measurement is introduced. Measurement error valuation is given on the basis of this model including statistical method.

Key words: deflection from roundness, centerless measurement, measurement error.

Метод бесцентрового измерения применяется при массовом контроле отклонения от круглости деталей в цеховых условиях [1]. Приборы для бесцентрового измерения в основном представляют собой различные комбинации призм и датчиков малых линейных перемещений. Также применяют накладные седлообразные приборы типа «наездник» для контроля труднодоступных профилей крупногабаритных деталей, например входных кромок турбинных лопаток [2]. Указанные приборы имеют простую конструкцию, высокую надёжность и малые габариты. Недостаток, препятствующий дальнейшему внедрению бесцентрового измерения, заключается в наличии методической погрешности измерения, составляющей от 20 до 100 % по различным данным [1–3]. Отсутствие математической модели измерения с достаточной степенью адекватности и как следствие возможности оценки погрешности и её минимизации затрудняют использование бесцентрового измерения отклонения от круглости при контроле высокоточных деталей.

Ниже представлена математическая модель, позволяющая моделировать процесс бесцентрового измерения деталей с профилями поперечного сечения, описанными тригонометрическими полиномами [4]. В результате получены уточнённые данные о погрешности измерения и влиянии на неё различных факторов.

Особенность бесцентрового измерения состоит в том, что показания прибора Δ_{Π} связаны со значением фактического отклонения от круглости Δ

уравнением $\Delta_{\Pi} = \mu \Delta$, где $\mu = f(\alpha, \beta, n)$ – коэффициент воспроизведения; α – угол призмы; β – угол, определяющий положение датчика; n – номер гармоники. В процессе измерения деталь базируется по граням призмы непосредственно измеряемой поверхностью. Поэтому погрешность установки приводит к изменению положения центра профиля (оси) детали и соответственно расстояния до измерительного датчика. Эти изменения прибор воспринимает так же, как и отклонения формы поверхности. Конкретный прибор с фиксированными значениями углов α и β имеет различные коэффициенты воспроизведения для разных гармонических составляющих профиля детали. Поскольку профиль детали описывается суперпозицией гармоник с различными амплитудами и начальными фазами, то установление коэффициента μ – сложная математическая задача.

Математическое описание процесса измерения рассматривается в три этапа [5]: нахождение центра средней окружности профиля детали после установки (для каждого текущего положения), определение радиусов измеренных датчиком точек профиля, расчёт отклонения от круглости по измеренным точкам.

Поперечный профиль детали в полярной системе координат

$$r = R + \sum_{n=2}^p a_n \cos(n\varphi - \varphi_n), \quad (1)$$

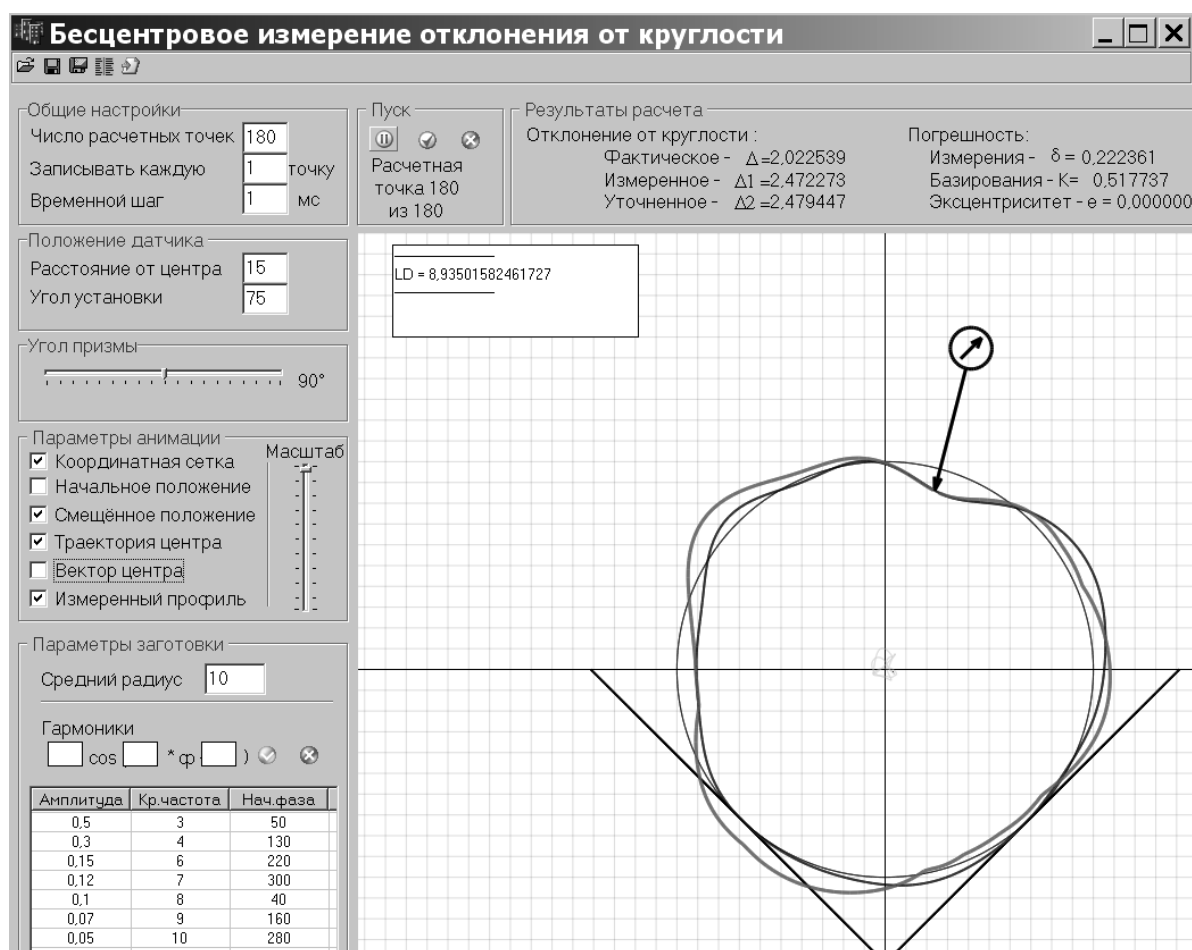


Рис. 2. Моделирование бесцентрового измерения

перпендикулярах к соответствующим граням призмы, проведённых через центр средней окружности профиля в исходном положении. Такая постановка задачи позволила получить формулы для коэффициента воспроизведения в явном виде, но без учёта влияния радиуса средней окружности измеряемой детали. В общем случае точки контакта не удовлетворяют указанному условию, а величина смещения центра средней окружности нелинейно зависит от амплитуды гармоники.

Установлено, что при использовании одной призмы с постоянными углом раскрытия и угловым положением датчика нельзя обеспечить коэффициент воспроизведения для отдельных гармоник не только близкий к единице, но и примерно постоянный для первых 20 гармоник. Исследования показали, что принцип суперпозиций при моделировании бесцентрового измерения не соблюдается. Поэтому рекомендации по настройке прибора, полученные при анализе отдельных гармоник, не позволяют эффективно минимизировать погрешность измерения в реальных производственных условиях.

Для контроля партии колец подшипников $\varnothing 30$ мм на ОАО «Саратовский подшипниковый завод» проведена оптимальная наладка прибора для бесцентрового измерения на основе метода статистического моделирования Монте-Карло и получены оценки относительной погрешности измерения. Исходными данными являлись результаты предварительного измерения на кругломере Talyrond 73. Установлено, что амплитуды гармоник распределены по закону Пирсона первого типа, а начальные фазы — по закону равных вероятностей. Между некоторыми гармониками имеются значимые корреляционные связи. Для статистического моделирования использована методика, изложенная в работе [6]. Результаты статистической обработки данных моделирования при измерении партии из 200 заготовок на призме с углом $\beta = 60$ и 90° при трёх положениях датчика $\alpha = 0; 15$ и 45° представлены на рис. 3. Исследования показали, что относительная погрешность измерения описывается нормальным или логнормальным законами с двумя параметрами — математическим ожиданием m и средне-

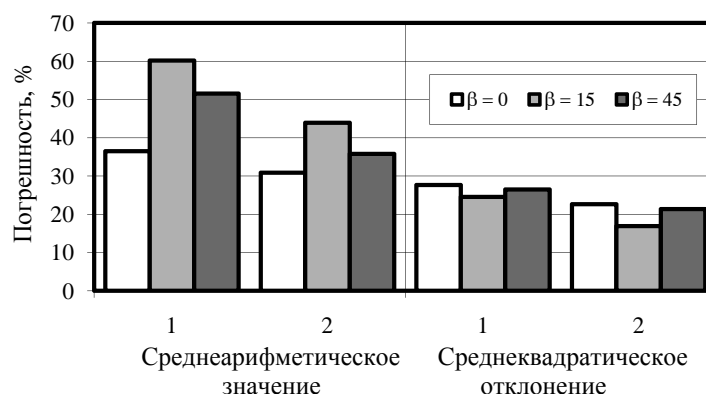


Рис. 3. Погрешность измерения отклонения от круглости:
 $\alpha = 60^\circ$ (1); $\alpha = 90^\circ$ (2)

квадратическим отклонением σ . Логнормальный закон получается при учёте корреляции между амплитудами отдельных гармоник.

Анализ рис. 3 показал, что минимальная погрешность измерения соответствует углу призмы $\alpha = 90^\circ$ и нулевому положению датчика. Среднеарифметическое относительной погрешности составило $m = 30,9\%$, а среднеквадратическое отклонение $\sigma = 22,6\%$. Таким образом, по сравнению с вариантом при $\alpha = 60^\circ$ и $\beta = 15^\circ$ примерно в 2 раза уменьшилось среднеарифметическое относительной погрешности измерения, хотя при этом среднеквадратическое отклонение не будет минимальным.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что оптимальная наладка призм с датчиками малых линейных перемещений в некоторых случаях существенно уменьшает методическую погрешность измерения. Предварительный анализ гармонического состава погрешностей формы на основе эталонного измерения на прецизионном кругломере и статистическое моделирование по разработанной модели позволяют интервально оценить погрешность измерения. Использование изложенного подхода рационально в

массовом производстве при контроле больших партий деталей в цеховых условиях.

Библиографические ссылки

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. 176 с.
2. Палей М.А., Чудов В.А. О возможностях седлообразных приборов при контроле диаметров и отклонений формы // Измерительная техника. 1972. № 4. С. 20–21.
3. Гебель И.Д. Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 24–27.
4. Захаров О.В., Погораздов В.В., Кочетков А.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм // Метрология. 2004. № 6. С. 3–10.
5. Бржозовский Б.М., Захаров О.В., Горшков В.В. Математическая модель бесцентрового измерения отклонения от круглости // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. Междунар. науч. конф. Саратов: СГТУ, 2008. Т.4. С. 141–143.
6. Лабутин С.А., Пугин М.В. Суммирование случайных погрешностей измерений и анализ погрешностей косвенных измерений методом Монте-Карло // Измерительная техника. 2000. № 11. С. 6–9.

Уважаемые авторы и читатели журнала!

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал «Автоматизация и современные технологии» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 621.7.022.6

Е.И. Ивкин, канд. техн. наук, И.А. Сироткин
(Московский авиационный институт)

sirotkin@moeller.ru

ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ НАПРАВЛЕННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Рассмотрена высокоинтенсивная направленная ультразвуковая очистка охлаждаемых каналов лопаток турбины в процессе их производства и ремонтных операций. Проведена классификация загрязнений. Описано применяемое оборудование для ультразвуковой очистки и диагностики качества очистки охлаждаемых каналов лопаток турбины. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: высокоинтенсивная ультразвуковая очистка, поверхностно-активные вещества, раствор кислоты, органический растворитель, эмульсионный состав, адсорбция.

High intensive directed ultrasonic cleaning of the cooled turbine blades in the production process and repair operations is considered. Dirtying classification was carried out. Equipment used for ultrasonic cleaning and cleaning quality diagnostics of the cooled turbine blades is described. Experimental research results are considered.

Key words: high intensive ultrasonic cleaning, surface active substance, acids solution, organic solvent, emulsion structure, absorption.

Ресурс газотурбинных двигателей (ГТД) во многом зависит от надёжности работы лопаток турбины, которые подвергаются высоким динамическим и циклическим нагрузкам при термических напряжениях и работают в условиях агрессивной газовой среды.

При изготовлении охлаждаемых лопаток выполняется более 100 операций, причём в большинстве случаев после обработки (выщелачивания, шлифования, гидроабразивной обработки, электроэрозии, рентгеновского анализа и т. д.) требуется очистка внутренних поверхностей лопаток. Как правило, это осуществляется подачей жидкости или воздуха под давлением. Выход годных деталей по засорам составляет 10–15 %, поэтому необходимы новые технологические решения, которые позволят очищать лопатки как при изготовлении, так и при ремонте.

Для очистки прецизионных изделий применяются ультразвуковые ванны, которые работают на частоте 20–40 кГц при интенсивности излучения в моющую среду до 2,5 Вт/см². Ультразвуковая очистка в таких ваннах эффективна в основном для наружных поверхностей деталей.

Внутренние полости, глубокие и малые отверстия требуют более интенсивных акустических полей с соответствующими им явлениями кавитации и турбулизации жидкости, что позволяет значительно интенсифицировать очистку сложноточечных деталей и узлов.

В настоящее время на предприятиях отечественного машиностроения не уделяется должное

внимание операциям очистки, что часто приводит к разрушению деталей при их эксплуатации.

На производстве и в процессе ремонта, как правило, сталкиваются с различными типами загрязнений. Это связано с тем, что при изготовлении деталей каждая операция обработки включает множество факторов воздействия на деталь. На этапах ремонта возникают загрязнения в основном биологического характера (мелкие частицы песка, солевых отложений и т. п.), износа деталей (стружка), использования специальных жидкостей (масел, консервационных жидкостей, топлива и т. д.). Поэтому необходимо анализировать большинство производственных операций, а также загрязнений, вызванных условиями эксплуатации.

В зависимости от предшествующих операций загрязнения можно подразделить на группы:

после механической обработки резанием (стружка, станочные эмульсии и смазки), чистовой или отделочной обработки, притирки, доводки (абразивная пыль и зерна, пасты, масла, смазки, эмульсии, наклеечные смолы);

после электроэрозионной обработки (шлам);
после литья (окалина, окисные плёнки, припа-
ры);

после термообработки (окалина, окисные плёнки, сажа, кокс, нагар, продукты осмоления и коксования);

после хромалитирования (спекшиеся частицы CrAl);

после рентгеновского анализа внутренних каналов лопаток турбин (металлический порошок).

Все загрязнения имеют различную связь с очищаемой поверхностью, поэтому можно выделить три основных вида связи:

механическая связь с очищаемой поверхностью, которая происходит за счёт сил трения (например, частички стружки, шаржированные частицы абразива и т. п.);

химическая связь с поверхностью, возникающая за счёт химического взаимодействия обрабатываемого материала с окружающей средой (окисные пленки, углеродистые отложения и т. д.);

адгезионная связь, которая обусловлена удержанием частиц и плёнок на поверхности твёрдого тела силами молекулярного взаимодействия, капиллярных сил в жидкости и рядом других причин (такую связь с поверхностью имеют различные лакокрасочные и жировые плёнки, мелкие механические частицы).

Технологические жидкости, используемые в процессах ультразвуковой очистки, подразделяются на моющие среды и жидкости для дополнительной обработки (предварительное замачивание, промывание, пассивирование и консервация изделий). Часто в качестве жидкостей для дополнительной обработки используют непосредственно моющие среды. Выбор технологических жидкостей является важной предпосылкой получения необходимого качества очистки. При подборе технологических жидкостей необходимо выполнить ряд требований, иногда противоречивых. Поэтому следует учитывать все особенности технологического процесса изготовления изделий, свойства их материала и состав загрязнений.

В качестве моющих сред при ультразвуковой очистке используются вода, водные растворы щелочей, поверхностно-активные вещества (ПАВ), растворы кислот, органические растворители и эмульсионные составы.

Основными свойствами ПАВ являются:

способность к адсорбции, т. е. способность молекул собираться на межфазной поверхности в концентрации, многократно превышающей концентрацию в объёмах граничащих фаз, и плотно заполнять поверхностный слой;

самопроизвольность протекания процесса адсорбции, термодинамически предопределяемая избытком свободной энергии на исходной поверхности раздела фаз и обеспечивающая концентрирование в той мере, в какой кинетические факторы (массоперенос, диффузия) позволяют осуществляться. В специфике физико-химических взаимодействий на межфазной границе лежат научные основы изменения в нужном направлении природы данной границы — гидрофилизации (при отмывании, нанесении ядохимикатов, вытеснении остаточной нефти), олефилизации (пигментов и наполнителей породы при пуске скважины).

При разработке процессов ультразвуковой очистки и эксплуатации ультразвукового оборудования необходимо уделять больше внимания контролю качества очистки. Неправильный выбор метода контроля может препятствовать достижению заданного критерия очистки или привести к необоснованному увеличению времени, т. е. снижению производительности и повышению энергоёмкости процесса.

Все методы контроля качества очистки можно разделить на две группы — прямые и косвенные.

К *прямым методам* контроля качества очистки относятся визуальный, фотографический и др., которые непосредственно отражают качество очищенной поверхности.

Косвенные методы, как правило, показывают одну из эксплуатационных характеристик очищенных деталей и разрабатываются исходя из условий эксплуатации каждой конкретной детали.

Охлаждаемые лопатки турбины ГТД подвергаются следующим методам контроля:

рентгенографический метод основан на получении рентгеновского снимка охлаждающих каналов лопаток. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет определить характер и место загрязнения во внутренних полостях лопаток. Это способствует получению статистических данных и выбору метода очистки. К недостаткам можно отнести невозможность количественно оценить степень засорённости. Побочным действием метода является тот факт, что при рентгеновской съёмке во внутреннюю полость лопатки засыпают металлический порошок, который также необходимо удалять;

тепловизионный метод основан на проведении испытаний, приближённых к рабочим условиям работы охлаждаемых лопаток турбины, и показывает степень охлаждения лопатки. Преимуществом данного метода, в отличие от рентгенографического, является количественная оценка качества охлаждения лопатки. К недостаткам следует отнести невозможность определения характера загрязнения, и определение точного места засора.

В общем случае комплекс оборудования для высокоамплитудной ультразвуковой очистки состоит из ультразвукового генератора, одной или нескольких стержневых колебательных систем и технологической установки с ваннами или камерами для проведения операции, снабжённой транспортными средствами и системами для поддержания заданных параметров технологических сред. Основной частью ультразвуковой установки является технологическое устройство, с помощью которого осуществляется технологический процесс, включающий комплекс операций как с ультразвуком, так и без него.

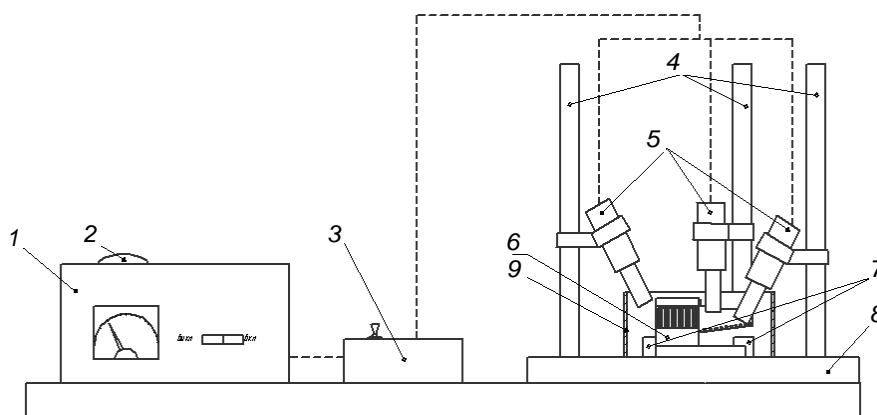


Рис. 1. Общий вид установки высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины:

1 – генератор; 2 – программатор; 3 – коммутатор; 4 – стойки;
5 – преобразователи; 6 – приспособление для фиксации и ориентирования лопатки;
7 – направляющие; 8 – стол; 9 – ванна

Показатель	Единица измерения	Величина
Мощность установки	Вт	До 1000
Резонансная частота пьезокерамического преобразователя	кГц	22
Амплитуда колебаний	мкм	До 50
Охлаждение пьезопреобразователей		Принудительное
Напряжение питания	В	220
Время обработки	с	От 2 и выше
Количество преобразователей	шт.	3

На основании геометрии лопатки и направления действия преобразователей (волноводов) разработано приспособление для крепления лопатки внутри ванны с технологической моющей жидкостью. Материал приспособления выбирался из соображений, что лопатка вместе с приспособлением должна находиться в агрессивной жидкости при повышенной относительно нормальных условий температуре под действием ультразвуковых волн и кавитации.

На рис. 1 представлена схема разработанной установки для высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток турбины.

В таблице приведена техническая характеристика установки высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины.

Для оценки загрязнений внутренних каналов турбинных лопаток были представлены рентгенографические снимки и результаты тепловизионных испытаний. По полученным данным сделаны следующие выводы:

во внутренней полости присутствуют загрязнения, снижающие эффективность охлаждения лопаток (рис. 2);

лопатки со стороны хвостовика практически не имеют загрязнений;

наибольшее загрязнение приходится на внутренние каналы пера лопатки, в особенности на выходную кромку лопатки (см. рис. 2);

на ряде лопаток значение загрязнения изменяется от минимального к максимальному (количеству) от центральной части к входной и выходной кромке.

В процессе очистки были получены следующие результаты:

средняя масса удалённых из одной лопатки загрязнений составляет 2–3 г при времени обработки до 2 мин;

оптимальный зазор от торца волновода до зоны обработки до 20 мм;

при обработке лопатки со стороны замка выделяется в 2–2,5 раза загрязнений больше, но качество очистки повышалось при последовательной обработке со всех сторон;

при загрязнениях в процессе ремонтных операций, когда в состав различного рода загрязнений входят смолистые загрязнения, являющиеся связывающим элементом между очищаемой поверхностью и загрязнениями твёрдой фракции,










Результаты			Выводы
рентгеновского анализа лопаток до очистки	тепловизионного контроля лопаток до очистки	тепловизионного контроля лопаток после очистки	
			1. Охлаждение затруднено в центральной части лопатки и выходной кромке 2. После очистки охлаждение лопатки удовлетворяет ТУ
			1. Охлаждение затруднено в центральной части лопатки и выходной кромке 2. После очистки охлаждение лопатки удовлетворяет ТУ
			1. Охлаждение затруднено в центральной части лопатки и выходной кромке 2. После очистки охлаждение лопатки удовлетворяет ТУ

Рис. 2. Результаты рентгенографических и тепловизионных исследований качества высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки лопаток турбины

рекомендуется чередование замачивания с очисткой (несколько циклов).

Технология, описанная выше, позволяет решить проблему очистки лопаток как при изготовлении, так и при ремонте, если выполняются следующие условия:

при изготовлении необходимо очищать лопатки после каждой операции, тогда общее время очистки (6 мин) можно снизить в 4–5 раз;

для замачивания и очистки лопаток, имеющих сильные загрязнения, рекомендуются биоразлагаемые на водной основе средства: «ТМ-Унилан», «ТМ-Унилан К50» и «ТМ-Унилан-Карбон»;

очистку проводить в подогретой до 60° жидкости;

для предотвращения вторичного загрязнения лопаток рекомендуется каждую лопатку очищать в профильтрованной жидкости;

очищенные с помощью ультразвука лопатки необходимо промывать проточной водой и просушивать.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

из всех известных технологий по очистке лопаток (внутренних каналов) разрабатываемая является наилучшей по производительности;

ультразвуковая очистка является наиболее дешёвой по отношению к другим технологиям очистки;

ультразвуковая очистка может применяться без специфических реагентов и химических средств (щёлочи применяются для интенсификации процесса и не являются основополагающими);

ультразвуковая очистка наиболее безопасна в обслуживании (эксплуатации);

при очистке охлаждающих каналов лопаток турбины метод высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки не приводит к повреждению детали при оптимально выбранном режиме обработки;

в процессе высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки деталей возможен процесс ультразвукового упрочнения поверхности за счёт создания высоких ударных нагрузок в зоне обработки. Данный эффект не сказывается на прочностных характеристиках лопаток турбины, так как в процессе работы они подвергаются действию высоких температур, которые значительно выше температуры релаксации материала, и как следствие, поверхностные напряжения релаксируют в процессе выхода ГТД на крейсерский режим работы.

Библиографические ссылки:

1. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
2. Панов А.П., Пискунов Ю.Ф. Высокоамплитудная ультразвуковая очистка. М.: Машиностроение, 1980. 52 с.

УДК 621.923

О.В. Захаров, канд. техн. наук, доц.
(Саратовский государственный технический университет)

zov17@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ ЗАГОТОВОК ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

Представлена математическая модель образования погрешностей формы заготовок в поперечном сечении при бесцентровом суперфинишировании. Рассмотрено влияние параметров наладки станка на отклонения траектории движения заготовок и указаны пути минимизации данных отклонений.

Ключевые слова: бесцентровое суперфиниширование, моделирование формообразования, погрешности формы заготовки.

Mathematical model of the shapes fault formation in the blank transversal section for centerless superfinishing is introduced. Influence of the machine tool setup parameters on the blank movement trajectory deviation is considered and means of deviation minimization are pointed out.

Key words: centerless superfinishing, shaping modeling, blank shapes fault.

Один из важных показателей геометрической точности деталей типа тел вращения — точность формы в поперечном сечении. Стандарт регламентирует отклонения формы комплексным показателем — отклонением от круглости и частными показателями — овальностью и огранкой. Указанные погрешности формы измеряют от базовой окружности, в качестве которой наиболее часто принимают среднюю окружность сечения детали, полученную методом наименьших квадратов [1].

Бесцентровое суперфиниширование выполняют на заключительном этапе технологического процесса для снижения отклонений формы и шероховатости поверхности заготовок. Однако обеспечение стабильности отклонения от круглости по-прежнему представляет собой серьезную проблему. В первую очередь, это объясняется большой склонностью к наследованию геометрической формы заготовок на операциях бесцентрового шлифования и суперфиниширования. Поэтому в результирующую погрешность обработки существенный вклад вносит погрешность базирования, обусловленная как частичным копированием исходных отклонений формы, так и образованием новых. Практический опыт указывает на возможность управления процессом за счёт наладки станков, но теоретические основы для этого недостаточно разработаны.

Математическая модель базирования при бесцентровом суперфинишировании рассмотрена в работе [2]. Однако наличие некоторых упрощений при постановке задачи привело к невысокой точности расчёта. Кроме того, отсутствие инва-

риантного критерия для оценки погрешности базирования обусловило сложность получения практических рекомендаций по оптимальной наладке станков. Приведённые факты говорят о том, что необходимо всестороннее исследование механизма образования погрешностей формы и построение математических моделей более высокой степени адекватности.

Поперечное сечение заготовки с отклонениями формы в полярной системе координат описывается тригонометрическим полиномом [3]:

$$r = r_0 + \sum_{n=2}^p a_n \cos(n\varphi - \varphi_n), \quad (1)$$

где r_0 — радиус средней окружности сечения заготовки; n — круговая частота (текущий номер гармоники); a_n — амплитуда n -й гармоники; φ — полярный угол; φ_n — начальная фаза n -й гармоники; p — максимальное число гармоник.

Задание поперечного сечения заготовки выражением (1) подразумевает, что в качестве базовой окружности используется средняя окружность. Первая гармоника не рассматривается, так как она в первом приближении представляет собой эксцентриситет центров средней окружности и начала системы координат.

При бесцентровом суперфинишировании заготовка базируется на двух валках, поперечные сечения которых можно представить окружностями радиусов R_1 и R_2 с центрами в точках A_1 и A_2 (рис. 1). Положение этих окружностей относительно начала системы координат (XOY) однозначно определено углами контакта α_1 и α_2 .

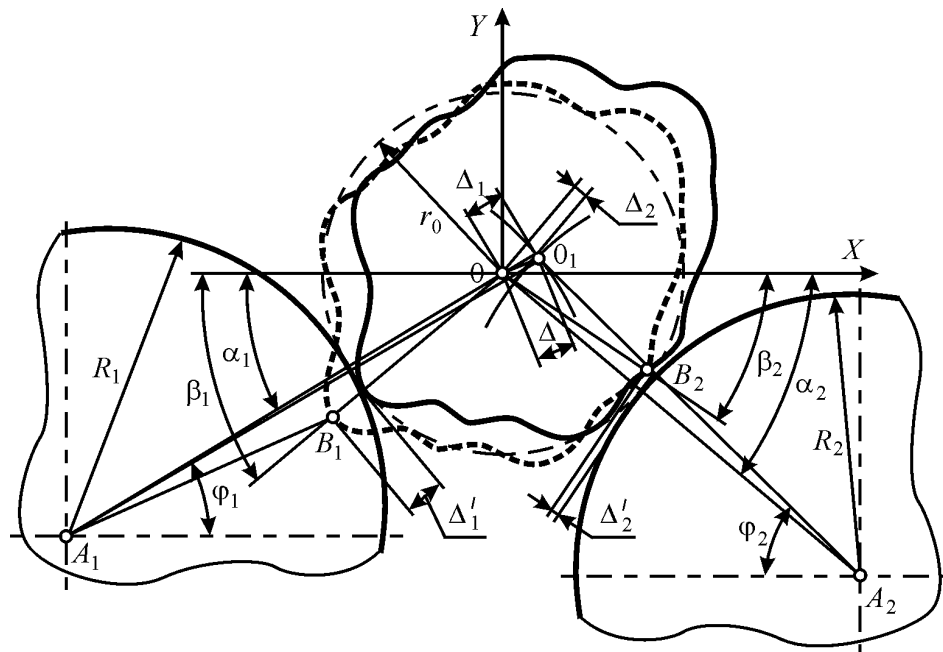


Рис. 1. Схема для расчёта погрешности базирования заготовки

Согласно определению, погрешность базирования — отклонение фактически достигнутого положения заготовки от требуемого. В данном случае требуемое положение — это положение геометрически точной цилиндрической заготовки некоторого диаметра с центром в начале системы координат 0, относительно которого на суперфинишном станке устанавливают наладочные углы α_1 и α_2 .

Таким образом, задача сводится к определению положения центра заготовки O_1 относительно начала системы координат 0. Для этого найдём точки контакта заготовки с валками, установив её в требуемое положение (на рис. 1 показано штриховой линией). Очевидно, что это будут те точки B_1 и B_2 сечения заготовки, которые наиболее близко расположены к базису валкам. Установим зазор между валками и заготовкой в исходном положении, выраженный величиной Δ' и полярным углом β :

$$\left. \begin{aligned} \Delta'_1(\beta_1) &= \{r(\beta_1 + 180^\circ) - r_1(\beta_1)\} \rightarrow \max; \\ \Delta'_2(\beta_2) &= \{r(360^\circ - \beta_2) - r_2(\beta_2)\} \rightarrow \max, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где r_1, r_2 — радиус-векторы сечений левого и правого валков.

Сечение левого валка представим окружностью со смещённым центром A_1 относительно начала полярной системы координат:

$$r_1^2 - 2r_1(R_1 + r_0)\cos(\varphi - \alpha_1) + r_0(2R_1 + r_0) = 0. \quad (3)$$

Квадратное уравнение (3) имеет два корня, геометрическому смыслу соответствует корень с отрицательным знаком перед радикалом:

$$r_1 = (R_1 + r_0)\cos(\varphi - \alpha_1) - \sqrt{(R_1 + r_0)^2 \cos^2(\varphi - \alpha_1) - r_0(r_0 + 2R_1)}. \quad (4)$$

Аналогичным образом в полярной системе координат описывают сечение правого валка r_2 .

Считаем, что при базировании заготовка, описанная уравнением (1), стремится занять устойчивое положение на двух валках. При этом заготовка имеет постоянный точечный контакт с обоими валками и перемещается от номинального положения, последовательно перекатываясь по валкам. Тогда проекцию Δ_1 смещения Δ'_1 на направление OA_1 найдём из треугольника OA_1B_1 по теореме косинусов:

$$(R_1 - \Delta_1)^2 = r_1^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2r_1(R_1 + r_0)\cos(\beta_1 - \alpha_1),$$

откуда после преобразований получим

$$\Delta_1 = R_1 - \sqrt{r_1^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2r_1(R_1 + r_0)\cos(\beta_1 - \alpha_1)}.$$

Также определим проекцию Δ_2 смещения Δ'_2 на направление OA_2 из треугольника OA_2B_2 :

$$\Delta_2 = R_2 - \sqrt{r_2^2 + (R_2 + r_0)^2 - 2r_2(R_2 + r_0)\cos(\beta_2 - \alpha_2)}.$$

В результате расстояние от центра заготовки O_1 до центра левого вала будет $A_1O_1 = R_1 + r_0 + \Delta_1$, а до центра правого вала $A_2O_1 = R_2 + r_0 + \Delta_2$. Для того, чтобы занять данное положение, центр заготовки O_1 последовательно движется по левому валу по дуге окружности радиуса A_1O_1 и по правому валу по дуге окружности радиуса A_2O_1 . Пересечение указанных окружностей и будет определять координаты точки O_1 в виде проекций на оси X и Y :

$$\left. \begin{aligned} -(R_1 + r_0) \cos \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \cos \varphi_1 &= \\ = (R_2 + r_0) \cos \alpha_2 - (R_2 + r_0 + \Delta_2) \cos \varphi_2; \\ -(R_1 + r_0) \sin \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \sin \varphi_1 &= \\ = -(R_2 + r_0) \sin \alpha_2 + (R_2 + r_0 + \Delta_2) \sin \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где φ_1 и φ_2 – углы наклона векторов A_1O_1 и A_2O_1 к оси X .

В уравнениях (5) первые слагаемые в левой и правой частях представляют собой проекции центров окружностей валков, а вторые слагаемые – проекции радиусов траекторий центра заготовки.

Решая систему уравнений (5), получим выражения для расчёта погрешности базирования:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= [(R_1 + r_0 + \Delta_1)^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2(R_1 + r_0 + \Delta_1) \times \\ &\times (R_1 + r_0) \cos(\alpha_1 - \varphi_1)]^{1/2}; \\ \varphi_1 &= \arccos \left[\frac{-ac - \sqrt{(ac)^2 - (c^2 - b^2)(a^2 + b^2)}}{2(a^2 + b^2)} \right], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $a = (R_2 + r_0) \cos \alpha_2 + (R_1 + r_0) \cos \alpha_1$; $b = (R_2 + r_0) \times \sin \alpha_2 - (R_1 + r_0) \sin \alpha_1$;

$$c = \frac{(R_2 + r_0 + \Delta_2)^2 - (a^2 + b^2) - (R_1 + r_0 + \Delta_1)^2}{2(R_1 + r_0 + \Delta_1)}.$$

При бесцентровом суперфинишировании заготовка непрерывно вращается, а центр O_1 её сечения все время меняет своё положение. Таким образом, погрешность базирования представляет собой переменную величину. После одного оборота точка O_1 опишет некоторый замкнутый контур, который и характеризует погрешность базирования.

В работе [4] предложен критерий базирования в виде среднего арифметического радиусов центра заготовки при одном обороте:

$$K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta(\varphi_i), \quad (7)$$

где φ_i – угол поворота заготовки при вращении; k – количество расчётных точек траектории.

На основе компьютерного моделирования по формулам (1)–(7) построены траектории центра заготовок в зависимости от наладочных углов контакта с валками (рис. 2). Заготовки имеют средний радиус $r_0 = 8$ мм и отклонения формы в виде 2, 3, 4 и 5-й гармоник с амплитудами $a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = 1$ мкм. В качестве варьируемого параметра выбран суммарный угол наладки $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, так как значения каждого из углов α_1 и α_2 влияют только на начало отсчёта полярного угла при вращении заготовки. Радиусы валков приняты $R_1 = R_2 = 62,5$ мм, а положение их центров A_1 и A_2 однозначно определено через параметры α_1 , α_2 и r_0 .

Траектория движения каждой точки сечения заготовки представляет собой кривую, конгруэнтную траектории центра. Поэтому именно траектория центра заготовки определяет форму и величину отклонения поперечного сечения. На рис. 2 траектории симметричны относительно оси Y , так как нулевые фазы гармоник приняты равными нулю, а углы контакта равны $\alpha_1 = \alpha_2$. Из-за того, что отклонения формы периодичны, полученные траектории центра при одном обороте заготовки повторяются число раз, равное номеру n рассматриваемой гармоники.

Анализ характерных траекторий центра заготовок при бесцентровом суперфинишировании показал, что при малых углах α траектории имеют форму, вытянутую по оси Y , а при больших углах – вытянутую по оси X . При траектории в виде прямой линии (например, 3-я гармоника, $\alpha = 60^\circ$) центр заготовки дважды проходит данную линию. Для каждой из гармоник существует некоторое оптимальное значение угла α , которому соответствует траектория минимального размера.

При большинстве наладок преобладают траектории овальной и трёхгранной формы, что и обусловливает появление таких же погрешностей на заготовке после бесцентрового шлифования и суперфиниширования. Указанные кривые при гармоническом анализе представляют собой спектр гармоник, а овальность лишь в первом приближении может ассоциироваться со 2-й гармоникой. Проведённые численные эксперименты не выявили строгих закономерностей между формой траектории и значениями угла наладки опор при рассмотрении отдельных гармоник.

По результатам моделирования был рассчитан критерий базирования K в зависимости от наладочного угла α (рис. 3). Для 2-й гармоники при углах $\alpha = 10^\circ$; 15° и для 3-й гармоники при угле $\alpha = 10^\circ$ имеет место провал заготовки между валками в ряде положений при её вращении. Поэтому критерий K для этих случаев не вычислен.

Анализ критерия K показал, что для 2, 3, 4 и 5-й гармоник оптимальным углом наладки в диа-

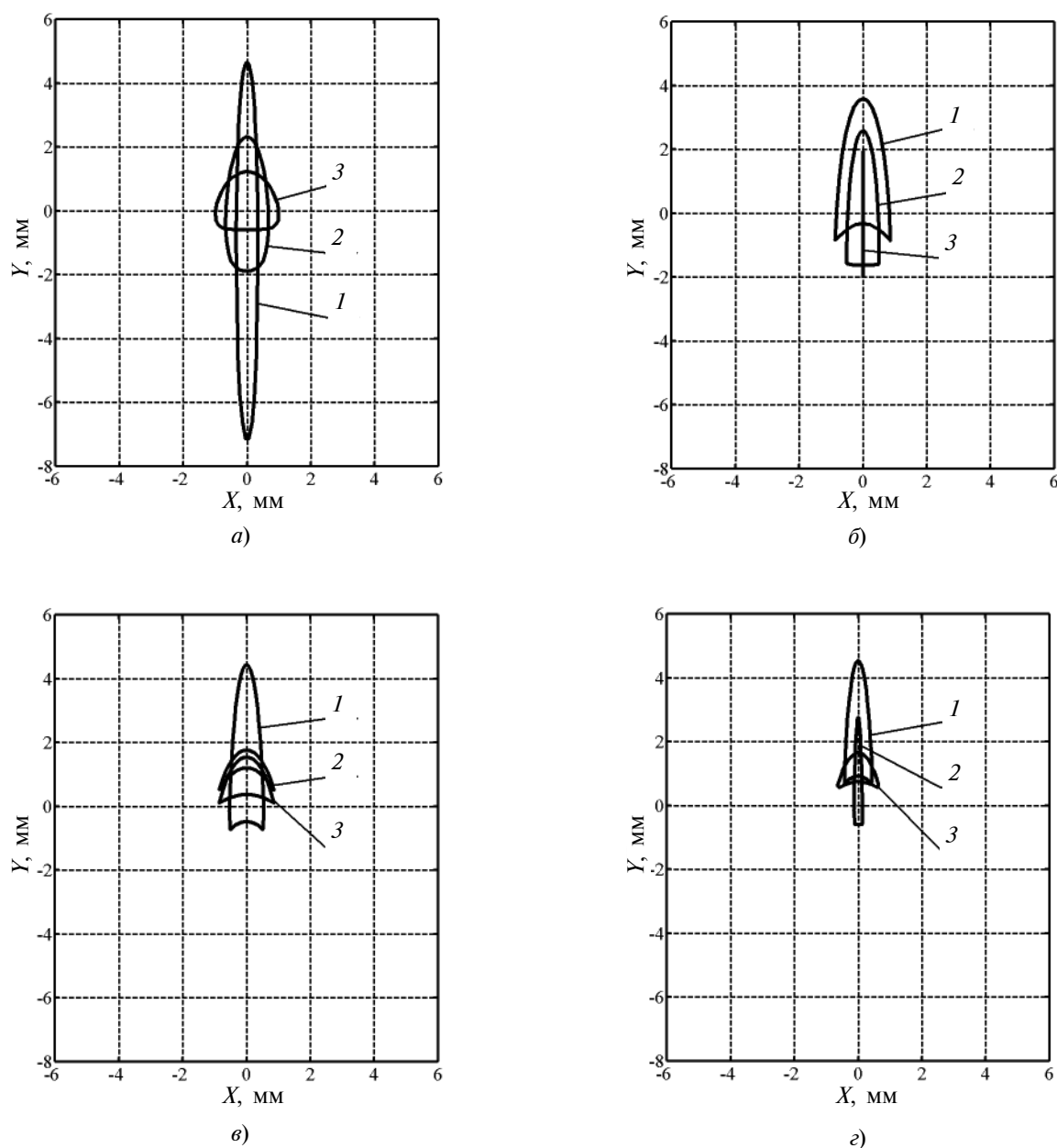


Рис. 2. Траектория движения центра заготовки:

a, б, в, г – соответственно 2-я, 3-я, 4-я и 5-я гармоники;
 $\alpha = 20^\circ$ (1); $\alpha = 40^\circ$ (2); $\alpha = 60^\circ$ (3)

пазоне $\alpha = 10\text{--}60^\circ$ будет максимальное значение 60° . Для приведённых примеров значения критерия K изменяются от 1 до 4,5, что говорит о копировании погрешностей базовой поверхности и наличии тенденции к появлению новых погрешностей. При уменьшении отношения радиусов валков R_1 , R_2 и заготовки r_0 наблюдается некоторое уменьшение K . Дополнительные исследования выявили, что оптимальные углы наладки располагаются в пределах $\alpha = 60\text{--}100^\circ$, однако реализация таких углов на суперфинишном станке невозможна по силовым ограничениям [5]. В разработанной математической модели базиро-

вания не учитывается положение траектории движения относительно инструмента (шлифовального бруска). Оптимальное расположение бруска способствует активному исправлению погрешностей формы за счёт широкого охвата заготовки, даже при значениях критерия K больше единицы.

Полученные результаты моделирования находятся в соответствии с многолетними экспериментальными и практическими данными обработки роликов подшипников на бесцентровых суперфинишных станках на ОАО «Саратовский подшипниковый завод».

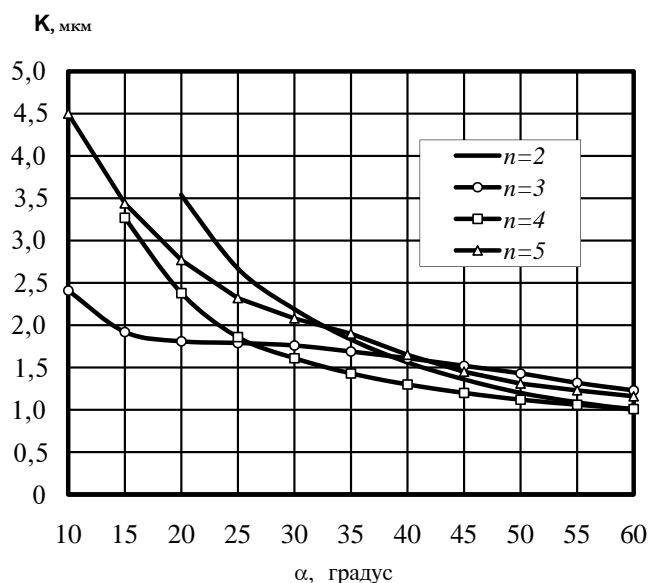


Рис. 3. Критерий базирования K для гармоник $n = 2-5$

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

механизм образования отклонений формы в поперечном сечении заготовок при бесцентровом суперфинишировании во многом определяется погрешностями базирования;

погрешности базирования могут в несколько раз превышать исходные отклонения формы заготовок в зависимости от гармонического состава этих отклонений и углов контакта с базирующими валками;

процесс базирования при бесцентровом суперфинишировании управляем на основе оптимальной наладки углов контакта валков с заготовкой;

характерные формы траектории движения центра заготовки — овальная и трёхгранная; нерациональным вариантом будет сильно вытянутая овальная траектория;

для минимизации погрешности базирования при доминировании амплитуд 2, 3, 4 и 5-й гармоник заготовок следует налаживать станок таким образом, чтобы обеспечить максимальные углы заготовки с валками, удовлетворяющие условию силового замыкания контакта.

Библиографические ссылки

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин М.: Изд-во стандартов, 1974. 176 с.
2. Бржозовский Б.М., Захаров О.В., Погораздов В.В. Формообразование поперечного сечения деталей при бесцентровом суперфинишировании // СТИН. 2002. № 12. С. 24–27.
3. Захаров О.В., Погораздов В.В., Кочетков А.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм // Метрология. 2004. № 6. С. 3–10.
4. Захаров О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке. Саратов: СГТУ, 2006. 152 с.
5. Захаров О.В. Условия силового замыкания контакта при бесцентровом суперфинишировании // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 1. С. 25–27.



СПРАВОЧНИК ТОКАРЯ-УНИВЕРСАЛА

В.Ф. Безъязычный, В.Г. Моисеев, Д.Г. Белецкий и др.

Под ред. М.Г. Шеметова, В.Ф. Безъязычного

576 с. : ил. ISBN: 978-5-217-03393-5

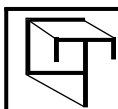
Цена 440 р.

Изложены сведения о процессах и режимах резания, нормировании токарных работ. Приведены методы повышения производительности труда, технические характеристики оборудования, описание технологической оснастки и инструмента, данные по обработке особо сложных деталей. Приведены сведения из опыта работы отечественных и зарубежных промышленных предприятий.

Второе издание (1-е изд. 1987 г.) переработано в соответствии с современной научно-технической документацией и дополнено сведениями об обеспечении точности и управлении качеством при токарной обработке. В приложении более развернуто представлен материал о повышении качества поверхности методами пластического деформирования.

Для токарей-универсалов всех отраслей промышленности, может быть полезен учащимся учреждений среднего профессионального образования.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 681.5.013

А.В. Юдин, канд. техн. наук, доц., К.Л. Лобацевич

(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва)

lobacevitch_k@mail.ru

БЕСПОИСКОВАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Рассмотрены причины, затрудняющие создание автоматических систем управления для установок направленной кристаллизации, использующих весовые методы контроля скорости кристаллизации. Предложена адаптивная беспойсковая система управления, основанная на разделении сигнала управления на постоянную и переменную составляющие.

Ключевые слова: адаптивная система, астатизм, скорость кристаллизации, весовой метод контроля.

Reasons complicating automatic control system creature for directed crystallization facilities utilizing weight methods for crystallization rate control are considered. Searchless adaptive control system based on the signal division on the constant and variable components is proposed.

Key words: adaptive system, astatizm, crystallization rate, weight control method.

При выращивании монокристаллов не всегда возможно измерить температуру в зоне кристаллизации. Такая ситуация характерна при производстве лейкосапфира. Кристаллизация ведётся при температуре, превышающей 2000°C. Использование термпар при такой температуре практически невозможно. Наличие в вакуумированной камере легколетучих соединений приводит к быстрому запылению оптического канала, что ограничивает возможность применения пирометров. Чаще всего процесс роста монокристалла автоматизируется на основе разомкнутого принципа управления, т. е. мощность сбрасывается по кусочно-линейному закону без обратной связи по температуре. Кроме того, развиваются весовые и оптические методы управления процессом кристаллизации. Весовые методы основаны на измерении массы кристалла, а оптические — на измерении диаметра.

При построении систем автоматического управления (САУ) процессом кристаллизации следует учитывать следующее ограничение: резкие изменения мощности (температуры) недопустимы. Высокая чувствительность системы к ошибке регулирования по массе обусловлена особенностью динамики процесса кристаллизации. В работе [1] описана зависимость скорости кристаллизации от теплофизических характеристик расплава:

$$\frac{dM}{dt} = a \frac{kT}{h} e^{-\frac{U}{kT}} \left(1 - e^{-\frac{L^*}{kT_m} \frac{\Delta T}{T}} \right), \quad (1)$$

где M — масса; U — энергия активации перехода атома через границу раздела фаз; a — межатомное расстояние (высота монослоя); ΔT — температурный градиент; L^* — теплота плавления на один атом; k — коэффициент теплопроводности; h — постоянная Планка; e — операция вычисления экспоненты.

Анализ выражения (1) показывает, что объект управления является нелинейным. Однако его можно представить как линейный объект с варьируемыми параметрами. В связи с этим реализация замкнутого принципа автоматического управления представляет определённую сложность и требует применения адаптивных систем управления.

В общем случае адаптивные САУ включают объект (О), регулятор (Р) и адаптер (А) (рис. 1) [2–6]. Объект и регулятор, вырабатывающий управляющее воздействие на объект, образуют основной контур. Регулятор содержит варьируемые параметры. Адаптер на основе обработки доступной информации вырабатывает управляющее воздействие, подстраивая варьируемые параметры регулятора, который совместно с адаптером образует адаптивный регулятор.

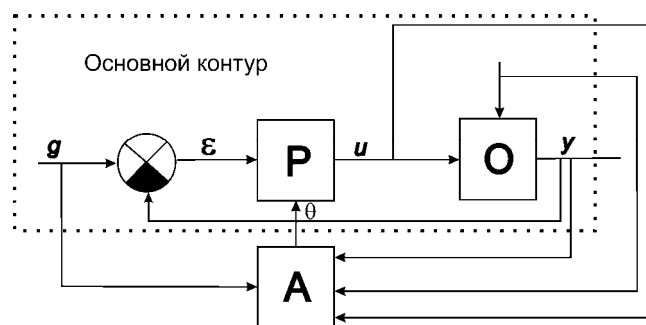


Рис. 1. Структура адаптивной САУ:

g — задающее воздействие; ε — рассогласование; u — выход регулятора;
 y — выход объекта; θ — корректирующее воздействие

Таким образом, адаптивная САУ имеет иерархическую структуру, т. е. два уровня. Основной контур образует первый (нижний) уровень, а контур, содержащий адаптер и называемый *контуром адаптации*, — второй уровень. Для работы контура адаптации необходимо знание эталонной модели объекта управления.

По способу изучения объекта адаптивные САУ делятся на поисковые и беспойсковые. Система считается *поисковой*, если для изучения объекта подаются специальные (поисковые) сигналы, и *беспойсковой* (БАС), если в систему поисковые сигналы для изучения объекта не подаются.

В БАС эталонная модель объекта управления, как правило, присутствует в виде реального динамического звена. За основу работы контуров самонастройки принимается непосредственно ошибка рассогласования движений основного контура и модели-эталона. Отсутствие дополнительных измерителей качества процессов основного контура и эталонной модели делает эти системы простыми и доступными для исполнения. Для БАС с эталонной моделью характерна настройка параметров основного контура под параметры эталонной модели. В этом случае эталонная модель представляет собой стационарное динамическое звено, выбранное заранее на основе априорной информации о входных воздействиях основного контура. В общем случае эталонная модель может быть перестраиваемой.

В качестве примера БАС с эталонной моделью можно привести способ управления изменением диаметра монокристаллов, выращиваемых способом Чохральского при весовом контроле, с двухканальным регулированием диаметра кристалла оптимальными регуляторами [7]. Способ включает действия по идентификации программы разрачивания, основанной на восстановлении (с помощью фильтра Калмана) текущих зна-

чений весового сигнала и его производных в ходе линейного уменьшения мощности нагрева тигля и неуправляемого разрачивания, сравнения этих величин с расчётными по модели процесса кристаллизации с последующим двухканальным регулированием диаметра кристалла оптимальными регуляторами по отклонению с заданной структурой.

Характерными причинами возмущений со стороны датчика веса являются несовершенство механических частей системы измерения веса и тепловые дрейфы электронных систем измерения веса. Возмущения, вызванные этими причинами, носят случайный и долговременный характер, что не позволяет эффективно подавлять их фильтрами. При этом требования к настройке канала регулирования при весовом контроле носят противоречивый характер. Система регулирования должна обеспечивать достаточно быструю реакцию на отклонение скорости изменения веса от заданного значения, но при этом не реагировать на случайные изменения в показаниях датчика веса.

Практика эксплуатации установок направленной кристаллизации показывает, что для поддержания температурного градиента необходимо кусочно-линейное снижение мощности. Это связано с особенностью конструкции теплового узла и изменяющимся размером растущего кристалла.

Зависимость температуры от мощности описывается дифференциальным уравнением первого порядка. Передаточная функция теплового узла при этом имеет вид

$$W(S) = \frac{K}{\tau S + 1},$$

где K — коэффициент передачи; τ — постоянная времени; S — оператор дифференцирования Лапласа.

При использовании традиционного ПИД-регулятора согласно формулам структурных преобразований передаточная функция замкнутой САУ имеет вид

$$W(S) = \frac{\tau S^2 + S}{\tau S^2 + K_P K S + K(K_P + K_I)}, \quad (2)$$

где K_P – коэффициент при пропорциональной составляющей сигнала управления ПИД-регулятора; K_I – коэффициент при интегральной составляющей сигнала управления ПИД-регулятора.

В общем случае выражение (2) можно представить как отношение многочленов:

$$W(S) = \frac{M(S)}{D(S)} = \frac{y}{g}.$$

Вычислим установившуюся составляющую ошибки САУ для управляющего воздействия g в виде

$$g(t) = \begin{cases} g_0 + g_1 t + \dots + g_r t^r, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}.$$

Пусть коэффициенты многочленов $D(S)$ и $M(S)$ удовлетворяют условию

$$a_{n-i} = b_{m-i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, v-1), \quad a_{n-v} \neq b_{m-v}.$$

САУ, для которых выполняется это условие, называются системами, имеющими v -й порядок астатизма.

Для рассматриваемого случая максимальная степень оператора Лапласа S в числителе выражения (2) равна 2, т. е. $n = 2$, в знаменателе выражения (2) максимальная степень равна 2, т. е. $m = 2$. Тогда при $i = 0$ выполняется равенство $a_2 = b_2 (\tau = \tau)$, но при $i = 1$ равенства коэффициентов не наблюдается, т. е. $a_1 \neq b_1 (1 \neq K_P K)$. Таким образом, можно утверждать, что система имеет первый порядок астатизма.

Поскольку порядок астатизма v совпадает с максимальной степенью полинома изменения мощности r , то величина установившейся ошибки определяется выражением

$$\varepsilon_y(t) = \frac{(a_{n-v} - b_{m-v}) g_r}{a_n},$$

т. е. установившаяся составляющая ошибки является постоянной величиной, прямо пропорциональной разности $(a_{n-v} - b_{m-v})$ и коэффициенту g_r и обратно пропорциональной коэффициенту a_n .

Для рассматриваемой САУ

$$\varepsilon_y(t) = \frac{(a_1 - b_1) g_1}{a_2} = \frac{(K_P K - 1) g_1}{\tau}.$$

Таким образом, для уменьшения статической ошибки (с учётом того, что $K_P K < 1$) следует увеличивать значение коэффициента пропорциональности K_P ПИД-регулятора. Однако повышение коэффициента пропорциональности увеличивает чувствительность САУ к возмущениям.

Статическую ошибку можно снизить без увеличения коэффициента пропорциональности только за счёт снижения величины g_1 , т. е. уменьшением скорости сброса мощности. Этот параметр определяется параметрами технологической установки и не может быть изменён произвольно. Эффект может быть получен искусственным вынесением части возмущающего воздействия сигнала управления за пределы контура обратной связи. В результате суммарное воздействие на объект управления останется неизменным, а уставка для контура обратной связи будет иметь меньшую скорость изменения. Нетрудно показать, что сумма двух линейных зависимостей

$$P' = p'_1 t + p'_0;$$

$$P'' = p''_1 t + p''_0,$$

даёт линейный закон управления

$$P = P' + P'' = (p'_1 + p''_1) t + (p'_0 + p''_0).$$

Таким образом, снижение статической ошибки и повышение помехоустойчивости достигаются тем, что сигнал управления разделён на две составляющие:

постоянную, устанавливаемую технологом на основании экспертных оценок;

переменную, определяемую ПИД-регулятором на основании текущей ошибки регулирования.

На рис. 2 приведена структура адаптивного регулятора скорости кристаллизации, в котором кроме основного контура поддержания скорости кристаллизации с ПИД-контроллером работает контур адаптивного управления, содержащий адаптер (А) и интегратор (И). Особенностью системы является сложный объект управления (ОУ), включающий многозонный термический объект (МТО), формирующий температурные градиенты, определяющие по формуле (1) скорость кристаллизации и интегратор. Интегратор вычисляет текущее значение массы, необходимое для перестройки адаптера.

На основании разности между измеренной скоростью изменения массы и значением уставки

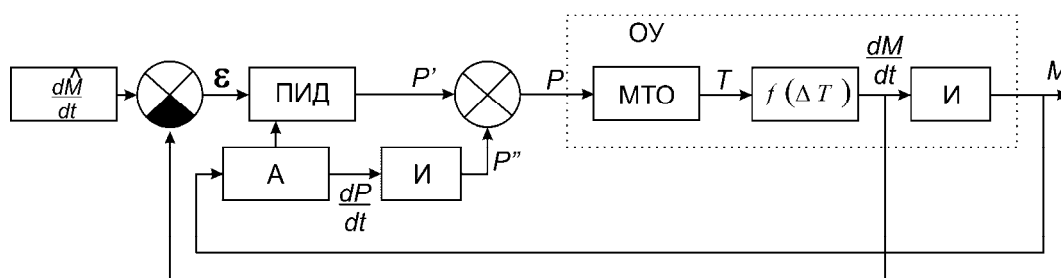


Рис. 2. Структура адаптивного регулятора скорости кристаллизации с прогнозированием

ПИД-регулятор вырабатывает управляющее воздействие P' . Под воздействием текущего значения массы M адаптер формирует сигнал скорости сброса мощности dP/dt . Его величина задаётся технологом на основании эталонной модели, полученной в результате экспертных оценок. При интегрировании сигнала сброса мощности формируется сигнал P'' , не зависящий от текущего значения скорости изменения массы, т. е. не восприимчивый к возмущению. Суммирование P' и P'' обеспечивает общий сигнал изменения мощности P на входе МТО.

Таким образом, предложенный способ разделения сигнала управления МТО на постоянную и переменную составляющие обеспечивает снижение чувствительности контура регулирования диаметра к внешним возмущающим факторам.

Библиографические ссылки

1. Жвавый С.П. Моделирование процессов плавления и кристаллизации монокристаллического кремния при воздействии наносекундного лазерного

излучения // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 58–62.

2. Соболев О.С. О применении методов искусственного интеллекта в системах управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 12. С. 35–37.

3. Синтез відмовостійких автоматизованих систем управління процесами вирощування високоякісних великогабаритних монокристалів. Автореф. дис. д-ра техн. наук. Харьков, 2006. 35 с.

4. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Под. ред. Н.М. Александровского. М.: Энергия, 1973. 272 с.

5. Левин Р.Л. Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем. М.: Финансы и статистика, 1990. 239 с.

6. Петров Б.Н. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.

7. Сатункин Г.А. Способ управления диаметром монокристаллов, выращиваемых способом Чохральского с жидкостной герметизацией при весовом контроле // Патент России № 2 067 625. 1996. Бюл. № 7.



СПРАВОЧНИК ИНСТРУМЕНТАЛЬЩИКА

Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов

464 с.: ил.

ISBN: 978-5-217-03389-8

Цена 363 р.

Помещены справочные данные, необходимые для конструирования и рациональной эксплуатации режущего и абразивно-алмазного инструмента. Приведены сведения о современных инструментальных материалах, режущих и вспомогательных инструментах, в том числе об инструментальной оснастке станков с ЧПУ, методах модификации рабочих поверхностей металлообрабатывающего инструмента, режимах термообработки, методах затачивания, контроля, маркировки, консервации и упаковки инструмента.

Предназначен для инженеров-конструкторов и технологов машиностроения, может быть полезен студентам технических университетов, обучающихся по специальности "Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и инструменты".

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 681.58

А.Б. Савиных, канд. техн. наук, доц., **Л.А. Стешина**, канд. техн. наук, доц., **Т.С. Буканова**
(Марийский государственный технический университет, г. Йошкар-Ола)

bukanova-tc@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИНТЕЗА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Рассмотрено энергосберегающее управление работой асинхронного двигателя, основанное на оптимизационной концепции современной теории управления. Предложены структура электропривода с замкнутым энергетическим циклом и микропроцессорная система управления электроприводом, реализующая функции энерго- и ресурсосбережения

Ключевые слова: энергосбережение, современная теория управления, оптимизационная концепция.

Energy-efficient control for asynchronous motor based on the optimization concept of the contemporary control theory is considered. Electric drive structure with enclosed energy cycle and microprocessor-based control system for electric drive implementing energy-saving and resource-saving functions are proposed.

Key words: energy-saving, contemporary control theory, optimization concept.

Введение. В настоящее время более 60 % всей вырабатываемой электрической энергии потребляется электродвигателями. Следовательно, эффективность энергосбережения в технологическом процессе в значительной мере определяется эффективностью электропривода. Разработка системы управления распределением и потреблением энергоресурсов электроприводом на базе современной оптимизационной концепции позволит создать принципиально новую высокопроизводительную энергосберегающую техническую систему с новыми свойствами.

Теоретическое обоснование. В настоящее время подавляющее большинство электроприводов строится на основе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Разработка системы управления асинхронным двигателем для энергосбережения и рационального использования материальных ресурсов является основной задачей при создании эффективного привода с оптимальными характеристиками.

На рынке электроприводного оборудования представлено несколько типов устройств систем управления электроприводом.

К первому типу можно отнести устройства плавного пуска [1], или так называемые софт-стартеры. Основная функция таких устройств состоит в ограничении пусковых токов электродвигателя. Использование софт-стартеров на производстве позволяет избежать повреждения асинхронных электродвигателей и увеличивает срок их службы в несколько раз. Однако устройства плавного пуска не удовлетворяют требованиям технологических режимов многих производственных механизмов, так как на разных этапах ра-

боты необходимо движение рабочего органа с различной скоростью. При этом требования к диапазону и точности регулирования скорости могут изменяться в зависимости от области применения электропривода.

Ко второму типу системы управления, удовлетворяющей поставленной задаче, можно отнести частотные преобразователи, которые реализуют способ управления работой электродвигателя плавным изменением частоты питающего напряжения. Для реализации системы управления электроприводом и решения задач регулирования скорости и момента в современном электроприводе применяют два основных метода частотного управления – скалярное и векторное [2].

Метод скалярного управления относительно прост в реализации и представляет собой изменение частоты и амплитуды питающего напряжения по закону $U/f_n = \text{const}$, где $n \geq 1$. Однако существуют и серьёзные недостатки. Для реализации системы скалярного управления необходимо наличие датчика скорости на выходном валу двигателя и датчика момента, которые очень дороги (зачастую их стоимость превышает стоимость всего электропривода). Но даже при наличии датчика управление моментом получается инерционным. Кроме того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент, и скорость, поэтому необходимо выбирать ту величину, которая является наиболее важной для данного технологического процесса.

В основе векторного управления лежат представления о переменных системы (напряжении, токе, потокоцеплении) как о пространственных векторах. Поэтому в систему управления закла-

дывается математическая модель двигателя, позволяющая рассчитывать момент на валу двигателя и частоту вращения вала. При векторном управлении достигаются точность регулирования скорости, плавное (без рывков) вращение двигателя в области малых частот, возможность обеспечения номинального момента на валу при нулевой скорости, быстрая реакция на изменение нагрузки (при резких скачках нагрузки практически нет скачков скорости). Наряду с очевидными преимуществами метод векторного управления имеет и некоторые недостатки: большая вычислительная сложность и необходимость знания параметров двигателя. Кроме того, при векторном управлении колебания скорости на постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении.

Представленные способы регулирования частоты вращения двигателя разработаны и применяются в промышленности, однако они не позволяют регулировать частоту вращения в широком диапазоне, а где это возможно – экономически невыгодно.

Современная концепция построения «объект – регулятор» как целостная неразделяемая конструкция при разработке системы управления приводом позволит создать техническую систему с новыми свойствами и решить поставленные задачи энерго- и ресурсосбережения в ходе технологического процесса.

Разработан способ энергосберегающего управления динамическими системами, заключающийся во введении внутрисистемных связей для оптимизации динамических режимов работы привода [3].

В соответствии с предлагаемым способом процессы энергоматериального обмена динамического объекта с внешней средой представлены на рис. 1.

Для реализации энергосберегающего управления электроприводом согласно предложенной структуре системы управления необходим электропривод с замкнутым энергетическим циклом, структура которого приведена на рис. 2.

Энергосберегающая система управления электроприводом с замкнутым энергетическим цик-

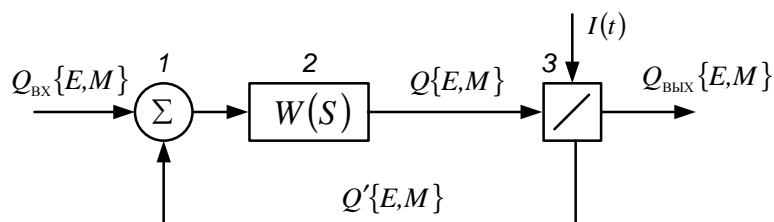


Рис. 1. Схема энергоматериального обмена динамического объекта с внешней средой:

I – устройство суммирования потоков; 2 – передаточная функция динамического объекта; 3 – устройство распределения потоков энергии и (или) вещества; $Q_{BX}\{E,M\}$ – вектор энергетических и материальных потоков на входе системы; $Q\{E,M\}$ – вектор энергетических и материальных потоков внутри системы; $Q_{ВЫХ}\{E,M\}$ – вектор энергетических и материальных потоков на выходе системы; $Q'\{E,M\}$ – вектор энергетических и материальных потоков обратной связи; $I(t)$ – управляющие сигналы

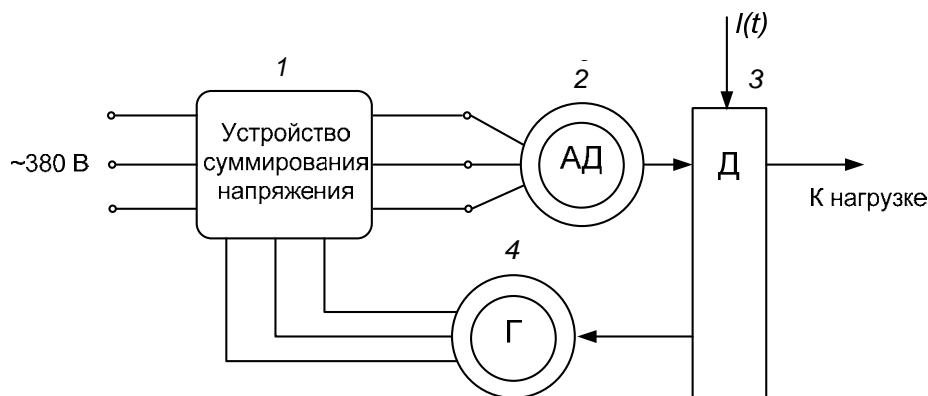


Рис. 2. Структура электропривода с замкнутым энергетическим циклом:

I – устройство суммирования напряжения; 2 – асинхронный двигатель; 3 – управляемый дифференциал; 4 – генератор

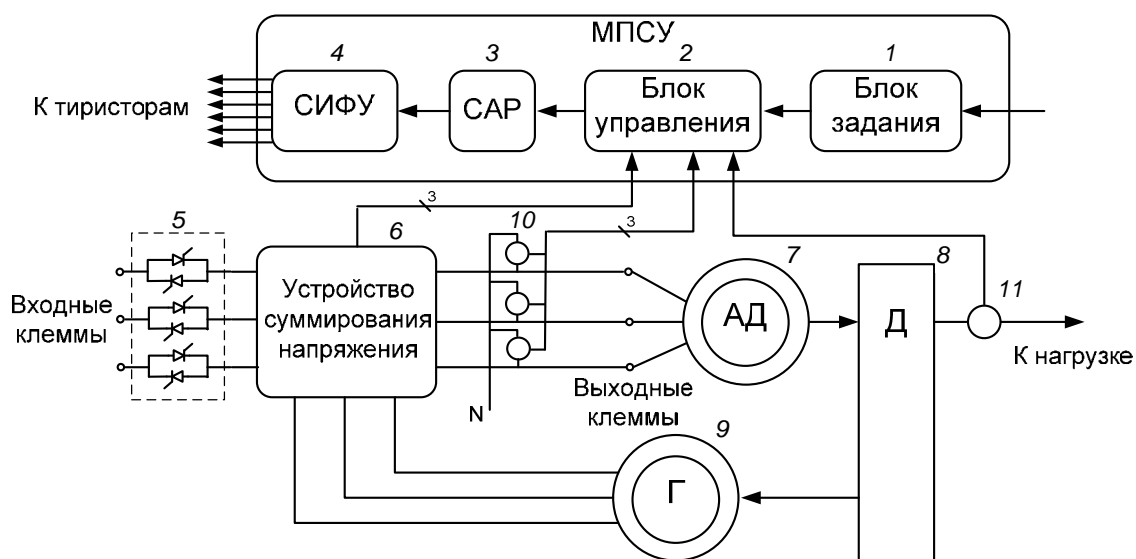


Рис. 3. Функциональная схема микропроцессорной системы управления электроприводом с замкнутым энергетическим циклом:

1 – блок задания; 2 – блок управления; 3 – система автоматического регулирования; 4 – система импульсно-фазового управления; 5 – блок тиристорных ключей; 6 – устройство суммирования напряжения; 7 – асинхронный двигатель; 8 – управляемый дифференциал; 9 – генератор; 10 – датчики напряжения фаз; 11 – датчик крутящего момента

лом строится на основе имеющегося в производстве оборудования — асинхронных двигателях, оснащается обратным технологическим контуром системы, позволяющим обеспечивать рециркуляцию потребляемой из сети энергии при её избытке на выходе электропривода. Обратный технологический контур представляет собой управляемый дифференциальный механизм плавного распределения потоков механической энергии и генератор, преобразующий механическую энергию на выходе двигателя в электрическую, служащую для питания электродвигателя.

Управление электроприводом с замкнутым энергетическим циклом осуществляется микропроцессорной системой управления, функциональная схема которой представлена на рис. 3.

Система управления электроприводом с замкнутым энергетическим циклом работает следующим образом.

После подключения сетевого трёхфазного напряжения и статорных обмоток асинхронного двигателя к блоку тиристорных ключей через входные (фазные провода и нейтраль) и выходные клеммы силовой цепи системы управления тиристорной станцией управления асинхронным двигателем осуществляется плавный пуск двигателя по заранее заданным параметрам. Датчики напряжения позволяют измерять напряжение на статорных обмотках асинхронного двигателя, а затем передают его значение в блок управления, где происходит обработка измерительных сигна-

лов с датчиков системы управления. Блок задания совместно с блоком управления подаёт задание на блок системы автоматического регулирования, которая с помощью системы импульсно-фазового управления управляет работой тиристорных ключей, регулируя фазное напряжение, что позволяет плавно увеличивать действующее значение напряжения на статорных обмотках асинхронного двигателя при разгоне.

Одновременно с этим на выходе двигателя вырабатывается крутящий момент, передаваемый на вход управляемого дифференциала, который распределяет крутящий момент на два независимых выходных вала: к нагрузке потребителя и к входному валу генератора. Блок управления через блок задания сравнивает крутящий момент на первом выходном валу дифференциала с помощью датчика крутящего момента с величиной крутящего момента, требуемой технологическим процессом в данный момент времени. При обнаружении избыточного крутящего момента на первом выходном валу дифференциала формируют сигнал управления дифференциалом, чтобы крутящий момент на первом выходном валу дифференциала соответствовал требуемому значению. Таким образом, избыточный механический момент, выработанный электродвигателем, передаётся на второй выходной вал управляемого дифференциала, соединённого с входным валом генератора. Под действием крутящего момента ротор генератора начинает вращение и вырабатывается электриче-

ское напряжение. С помощью устройства суммирования напряжение, подаваемое на его вход с блока тиристорных ключей и с обмоток генератора, суммируется с последующей передачей на статорные обмотки асинхронного двигателя. Таким образом, напряжение, выработанное генератором, используется для питания электродвигателя.

Датчики напряжения позволяют измерять действующее значение напряжения на статорных обмотках двигателя. При его отклонении от заданного формируют сигнал управления на систему импульсно-фазового управления через блок управления и систему автоматического регулирования таким образом, что напряжение на выходе блока тиристорных ключей после прохождения через устройство суммирования напряжения компенсирует недостаток напряжения на статорных обмотках асинхронного двигателя в соответствии с режимом работы.

При функционировании предлагаемой системы электрическая энергия, потребляемая двигателем, преобразуется в крутящий момент, который передаётся на входной вал управляемого дифференциала. Система управления сравнивает крутящий момент, выработанный электродвигателем, с величиной, необходимой для технологического процесса. Если переданный крутящий момент не был востребован на первом выходном валу управляемого дифференциала, соединённого с нагрузкой, то вследствие перераспределения крутящего момента между выходными валами управляемого дифференциала избыточный крутящий момент передаётся на второй выходной вал, соединённый со входом генератора. Выработанное генератором напряжение поступает на вход устройства суммирования напряжения и вновь используется для питания двигателя. Таким образом, из сети двигатель будет потреблять в основном полезную мощность, необходимую для работы электродвигателя, что снижает энергопотребление двигателем из сети и повышает КПД работы устройства.

Предлагаемая система управления электроприводом с замкнутым энергетическим циклом позволяет регулировать технологическое оборудование со стабильными значениями момента на выходном валу за счёт управляемого распределения выработанного двигателем крутящего момента посредством управляемого дифференциала.

Система управления электроприводом с замкнутым энергетическим циклом за счёт использования управляемого дифференциала позволяет осуществить не только плавный пуск и останов двигателя, но и обеспечить непрерывное функционирование двигателя при регулировании технологического оборудования независимо от величины нагрузки, т. е. обеспечить работу без повторно-кратковременных режимов, что увеличивает ресурс работы двигателя.

Выводы. Представленная энергосберегающая система управления электроприводом с замкнутым энергетическим циклом позволяет сократить потребление электроэнергии в процессе управления, увеличить ресурсосбережение за счёт повышения точности поддержания технологических режимов, расширить эксплуатационные характеристики электропривода при нагрузках значительно ниже номинальных, обеспечить надёжную работу во всем диапазоне изменения нагрузок, увеличить срок эксплуатации электродвигателя.

Приведённые результаты исследований получены при поддержке программ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010)» по государственному контракту № 2.1.2/6206 «Исследование устойчивости и обеспечение инвариантности энергосберегающих систем адаптивного управления динамическими объектами» и «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») по государственному контракту № 6538р/9098 «Разработка новых наукоемких приборов, техники и технологии в области машиностроения и электроники».

Библиографические ссылки

1. **Кацман М.М.** Справочник по электрическим машинам: Учеб. пос. для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 480 с.
2. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 272 с.
3. **Стешина Л.А.** Способ энергосберегающего управления динамическими системами // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 4.2(30). С. 295–297.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,
можно найти на сайте **www.mashin.ru**

УКД 621.77–868.1

Д.Б. Лопух, канд. техн. наук, доц., А.В. Вавилов, А.П. Мартынов
(Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»),
Дж. Роуч (Айдахская национальная лаборатория, США),
Дж. Ричардсон (ООО «Перспективные инженерные технологии», США)

avvavilov@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ В ХОЛОДНОМ ТИГЛЕ

Предложен программно-аппаратный информационно-измерительный комплекс, представляющий собой автоматизированную систему контроля для индукционной плавки в холодном тигле, базирующуюся на современных высокоскоростных регистраторах сигналов компании «National Instruments» и системе графического программирования NI LabVIEW. Представлены результаты работы комплекса во время индукционной варки в холодном тигле боросиликатного стекла.

Ключевые слова: контроль и управление индукционной плавкой, холодный тигель, измерение высокочастотных параметров, LabVIEW, коэффициент мощности индуктора, оксиды, стёкла.

Programmatically-hard information-measuring complex is proposed. The complex represents automatic control system for the induction melting in the cold crucible based on the contemporary high speed signal registers from «National Instruments» and graphic programming system NI LabVIEW. Complex work results during borosilicate glass induction melting in the cold crucible are introduced.

Key words: inspection and control of the induction melting, cold crucible, high-frequency parameters measuring, LabVIEW, inductor power coefficient, oxides, glasses.

Введение. На протяжении более 20 лет среда графического программирования LabVIEW позволяет инженерам и учёным применять революционные методы разработки масштабируемых приложений для задач тестирования, измерений и управления. Накопленный опыт даёт возможность быстро и без больших затрат осуществлять взаимодействие между оборудованием для измерений и управления, проводить анализ данных, передавать результаты через сетевые интерфейсы и создавать распределённые системы.

Появление высокоскоростных регистраторов сигналов компании «National Instruments» с полосой пропускания до 300 МГц и частотой опроса до 1 ГГц на канал, предназначенных для проведения измерений параметров сигналов во временной и спектральной областях, в сочетании со средой графического программирования LabVIEW, позволило иметь инструменты для исследования технологических процессов, основанных на индукционном нагреве. С помощью гибкого программного обеспечения данные приборы можно использовать в качестве осциллографов, анализаторов спектра, частотомеров и подобных измерительных инструментов.

Одним из направлений применения индукционного нагрева является плавка оксидов металлов и варка стёкол. В ряде промышленных технологий с использованием индукционного на-

грева применяют холодные тигли, на базе которых реализуют такие технологические процессы, как выращивание монокристаллов фианитов; непрерывный переплав порошков оксидов с получением поликристаллических слитков для дальнейшего передела; непрерывная плавка на выпуск с раздувом струи расплава и получением штапельного минерального волокна в виде теплоизоляционных матов или гранул и сфер; остекловывание радиоактивных отходов, физическое моделирование процессов, протекающих при тяжёлых авариях ядерных реакторов, и др. В этих процессах используется так называемый метод индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) [1]. Развитие и совершенствование этих технологий во многом зависят от качественного управления технологическим процессом, которое способствует повышению надёжности и производительности, а также качества получаемого продукта.

Статья посвящена разработке и исследованию работы программно-аппаратного информационно-измерительного комплекса, представляющего собой систему контроля для ИПХТ на основе математической обработки выборок мгновенных значений тока и напряжения индуктора. Комплекс предназначен для регистрации, обработки, архивирования и визуализации параметров ИПХТ в режиме реального времени.

Постановка задачи. Основная задача работы – разработка и создание автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) варки стекла в индукционной печи с холодным тиглем. В частности, в США ведётся разработка такой системы для остекловывания высокоактивных отходов [2]. На первом этапе создания АСУ ТП необходимо разработать программно-аппаратный информационно-измерительный комплекс для регистрации, обработки и архивирования параметров плавки в режиме реального времени, позволяющий оператору контролировать ИПХТ [3, 4]. Работа выполняется лабораторией индукционной плавки в холодных тиглях на кафедре электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») при поддержке Айдахской национальной лаборатории (США).

Обычно управление технологическими процессами ведётся по одному или нескольким параметрам, которые, во-первых, наиболее значительно изменяются в процессе, во-вторых, измеряются с достаточной точностью для управления процессом.

Во многих процессах ИПХТ целесообразно ограничивать температуру расплава определённым верхним значением, которое рекомендуется стабилизировать во время плавки. Наилучшим является прямой способ стабилизации температуры расплава по её измеренному значению. Однако в условиях плавки пары, газы и аэрозоли препятствуют корректному измерению температуры расплава. Поэтому необходимо применять способы косвенной стабилизации температуры по измеряемым или расчётным тепловым и электрическим параметрам.

В общем случае, когда в процессе меняется температура и объём расплава, в качестве параметра управления можно использовать удельную объёмную мощность в расплаве, определяемую

по электрическим сигналам индуктора. По мнению авторов, этот параметр наилучшим образом отражает изменение температуры расплава. Для определения удельной объёмной мощности в расплаве необходимо знать ряд параметров, например таких, как коэффициент мощности индуктора (PF), $\cos\varphi$ индуктора, электрический КПД индуктора, объём расплава, частота тока, а также ток и напряжение индуктора.

Основной особенностью процессов на базе ИПХТ является использование высоких частот тока от 66 кГц до 27 МГц [1]. Это определяет трудности измерения и аналого-цифрового преобразования сигналов тока и напряжения индуктора, а также других сигналов, подверженных влиянию высокочастотных помех.

Если последнее обстоятельство решается установкой низкочастотных фильтров, оптических гальванических развязок, а также особыми способами заземления, то разработка датчиков индуктора, способных работать в режиме реального времени, является актуальной задачей.

Решение такой задачи позволило бы иметь почти полную информацию об индукционной системе и создать систему управления высокого качества, используя в качестве безынерционного параметра управления удельную объёмную мощность расплава либо угол сдвига фаз между первыми гармониками тока и напряжения индуктора. Особенно это важно при управлении процессами переработки высокоактивных отходов, в которых управление ведётся дистанционно.

Важнейшей частью разработанного программно-аппаратного информационно-измерительного комплекса является программное обеспечение, имеющее распределённую структуру (рис. 1).

Каждая программа функционирует независимо на серверах, где производятся регистрация и основная математическая обработка результатов измерений.

Описание системы контроля на основе программы «Phase». В данной статье рассмотрена только



Рис. 1. Структура программного обеспечения измерительного комплекса

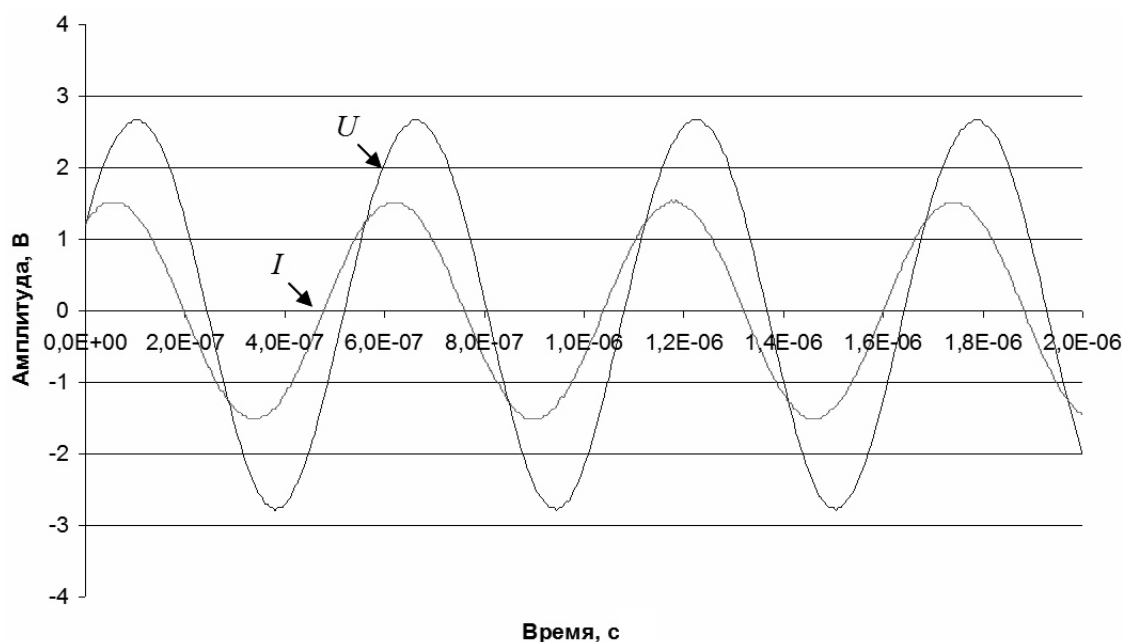


Рис. 2. Выходные сигналы датчиков тока и напряжения индуктора, полученные на частоте опроса 200 МГц

программа «Phase». Она производит обработку быстро меняющихся параметров плавки, а именно высокочастотных сигналов тока и напряжения индуктора, которые из-за наличия тиристорного регулятора мощности лампового генератора являются амплитудно-модулированными. С помощью программы «Phase» решаются задачи цифровой обработки выборок мгновенных значений сигналов тока и напряжения индуктора с целью вычисления угла сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения индуктора, их среднеквадратичных значений RMS , активной P_a , реактивной Q и полной S мощностей, подводимых к индуктору, $\cos\phi$ и коэффициента мощности индуктора PF , а также частоты тока F индуктора. Перечисленные параметры индуктора вычисляются не более, чем за 0,7 с.

Поскольку для измерения тока и напряжения на индукторе не существует серийно выпускаемых приборов, удовлетворяющих компьютеризированной системе сбора информации, были разработаны и изготовлены датчики напряжения и тока индуктора.

Датчик напряжения выполнен как понижающий трансформатор напряжения индуктивного типа, подключенный к виткам индуктора. Датчик тока располагается непосредственно между токоподводящими шинами индуктора, где обеспечивается наилучшая равномерность магнитного потока и постоянство структуры электромагнитного поля. Датчики тока и напряжения обладают следующими техническими характеристиками:

частота входного сигнала — $1,76 \pm 15\%$ МГц;
гальваническая развязка выходного и входного сигналов;

уровень выходного сигнала — 0–5 В;
измеряемое напряжение — до 10 кВ, а ток — до 300 А [4].

Калибровка датчика напряжения произведена с помощью статических вольтметров с погрешностью 2 %, а калибровка датчика тока осуществлена расчётным путём по формуле (1) с погрешностью 2,5 %.

На рис. 2 представлены выходные сигналы датчиков тока и напряжения индуктора, полученные на частоте опроса 200 МГц.

Сигналы, полученные с датчиков, проходят аналого-цифровое преобразование с помощью высокоскоростного регистратора сигналов NI PCI-5152 с частотой опроса не менее 100 МГц и длиной выборок свыше 2 млн отсчётов. Далее в режиме реального времени производится обработка выборок мгновенных значений сигналов тока и напряжения индуктора, в основу которых положены следующие принципы.

Среднеквадратичное значение непрерывного сигнала напряжения индуктора $U(t)$ в интервале времени от t_1 до t_2 определяется уравнением

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U^2(t) dt},$$

где t_2, \dots, t_1 — время интегрирования или время измерения.

Поскольку выборка мгновенных значений параметров, например напряжения индуктора, представляет собой дискретный сигнал U_i , то его среднеквадратичное значение определяется уравнением

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^2},$$

где N – размер выборки; U_i – i -й элемент в выборке мгновенных значений сигнала напряжения индуктора [5].

Вычисление действующего значения тока индуктора I_{LRMS} производится по формуле

$$I_{LRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2}.$$

Калибровка датчика тока основывается на резонансе токов в параллельном колебательном контуре. Калибровка производится с использованием формулы

$$I_{LRMS} = I_{CRMS} = U_{KB} 2\pi FC,$$

где I_{LRMS} – действующее значение тока индуктора; I_{CRMS} – действующее значение тока конденсаторной батареи; U_{KB} – действующее значение напряжения на конденсаторной батарее; C – ёмкость конденсаторной батареи.

Измерения ёмкости конденсаторной батареи до и после плавки показывают практически одинаковые значения, что свидетельствует о незначительном нагреве конденсаторов. Значение ёмкости в процессе калибровки считали постоянным. Ёмкость C измеряли прецизионным RLC-метром с погрешностью 0,05 %. Напряжение на конденсаторной батарее U_{KB} измерено статическим киловольтметром с погрешностью 2 %. Частота тока индуктора F вычислена по методике, описанной ниже.

Как правило, мгновенная электрическая мощность $p(t)$, выделяющаяся в элементе электрической цепи (в данном случае индукторе и в расплаве стекла), представляет собой произведение мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ на этом элементе: $p(t) = i(t) \cdot u(t)$.

Активная мощность P_a , подводимая к индуктору – это среднее значение мгновенной мощности за период T :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt.$$

Для сигнала, представленного выборкой мгновенных значений тока и напряжения индуктора, среднее значение активной мощности индуктора за период измерения определяется уравнением

$$P_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i I_i),$$

где I_i – i -й элемент в выборке мгновенных значений сигнала тока индуктора [6].

Полная S и реактивная Q мощность определяются по формулам

$$S = U_{RMS} I_{RMS};$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P_a^2}.$$

Кроме того, система контроля позволяет производить расчёт коэффициента мощности индуктора PF по формуле

$$PF = \frac{P_a}{S}.$$

Особое внимание следует уделить вычислению такого сложного для данного случая параметра, как угол ϕ сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения индуктора. Его вычисление основывается на использовании метода быстрого преобразования Фурье FFT . На первом этапе вычисляют взаимные амплитудный и фазовый спектры сигналов тока и напряжения индуктора. Поскольку угол ϕ есть угол сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения индуктора, то во взаимном амплитудном спектре находится порядковый номер максимума, что соответствует основной частоте сигнала, т. е. первой гармонике. Далее во взаимном фазовом спектре находится значение, соответствующее определённому выше порядковому номеру. Найденное таким образом значение представляет собой угол сдвига фазы между первыми гармониками сигналов тока и напряжения индуктора.

Сложность задачи заключается в том, что необходимо вычислить угол ϕ для амплитудно-модулированных сигналов основной частоты 1,76 МГц с частотой модуляции 300 Гц высокого напряжения до 10 кВт и высоких токов до 300 А. Поэтому для измерения сигналов тока и напряжения индуктора используются описанные выше специальные датчики, преобразующие высоковольтные и сильно-токовые сигналы в нормированные сигналы от 0 до 5 В. Использование таких датчиков вносит

дополнительный фазовый сдвиг сигналов, так называемый балластный угол, что существенно затрудняет определение истинного значения угла φ .

Для корректировки угла φ устранением балластного угла разработаны специальные алгоритмы изменения фазы каждого из сигналов индуктора, основанные на использовании быстрого преобразования Гильберта (*FHT*). Оно представляет собой идеальный широкополосный фазовращатель, который осуществляет сдвиг начальных фаз всех частотных составляющих сигнала на заданный угол. Данный алгоритм позволяет произвести калибровку угла φ . Калибровка осуществляется с помощью калориметрических измерений печи в режиме реального времени при плавке, что позволяет определить активную мощность, подводимую к индуктору. Далее в цикле программы производится ступенчатый сдвиг фазы каждого из сигналов. Он осуществляется до тех пор, пока активная мощность, вычисленная по сигналам тока и напряжения индуктора, не будет равна активной мощности, определённой методом калориметрических измерений. Точность данного метода напрямую зависит от качества и погрешности калориметрирования.

Использование в процессе калориметрических измерений современных измерительных приборов позволяет вычислять активную мощность индуктора с погрешностью не более 0,3 %. Разработанное программное обеспечение и данная методика дают возможность произвести калибровку с точностью ± 50 Вт. Отметим, что увеличение вычислительной мощности сервера позволит значительно сократить погрешность калибровки.

Можно выделить такой параметр, как частота тока индуктора F . Вычисление также основано на быстром преобразовании Фурье. Оценка частоты производится по семи спектральным линиям в области максимума во взаимном амплитудном спектре сигналов тока и напряжения индуктора.

На рис. 3 изображена упрощённая структурная схема программы «Phase».

На рис. 4 представлено основное окно интерфейса программы «Phase». В верхней части этого

окна показаны амплитудно-модулированные сигналы индуктора, в нижней (снизу вверх) — следующие сигналы индуктора: I_{RMS} , φ , U_{RMS} и F .

Разработанные аппаратная и программная части информационно-измерительного комплекса используются в качестве законченной автоматизированной системы контроля для индукционной плавки. Комплекс позволяет определять все характеристики ИПХТ, необходимые для контроля процесса плавки, а также фиксировать и исследовать новые эффекты плавки.

Основными возможностями системы контроля для индукционной плавки на основе цифровой математической обработки выборок мгновенных значений тока и напряжения индуктора в режиме реального времени являются:

регистрация, математическая обработка, архивирование и визуализация параметров в цикле не более 700 мс с помощью программы «Phase»;

передача полученных результатов по беспроводной промышленной сети на удалённое рабочее место оператора с её последующей визуализацией и дополнительным архивированием;

получение параметров плавки в условиях высокочастотных помех с низкими флуктуациями, колеблющимися от 0,005 до 0,3 % от измеренного либо вычисленного значения;

низкая относительная погрешность измерений параметров (от 0,01 до 2,5 %);

высокая чувствительность изменения угла сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения индуктора от температуры поверхности расплава. Например, во время плавки зафиксировано, что изменение температуры на 0,5 °C соответствует изменению угла φ на 0,0035° (рис. 5).

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость угла φ от температуры расплава боросиликатного стекла, содержащего имитаторы радиоактивных отходов; диаметр ванны расплава 290 мм, высота 110 мм, t — температура на поверхности расплава, φ — угол сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения индуктора. Угол φ не имеет реального значения и содержит дополнительный фазовый сдвиг, вно-

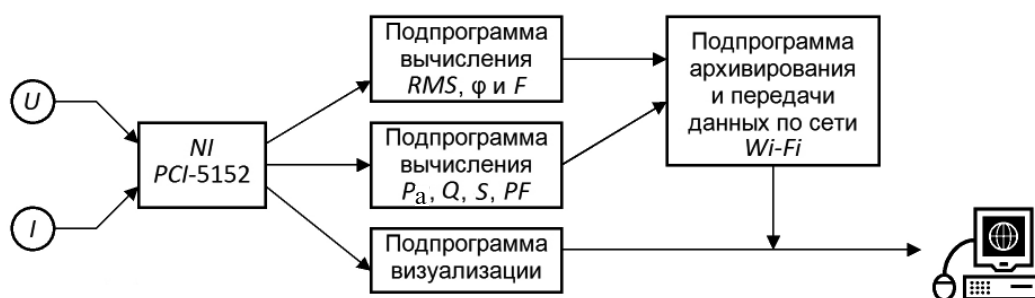


Рис. 3. Упрощённая структурная схема программы «Phase»

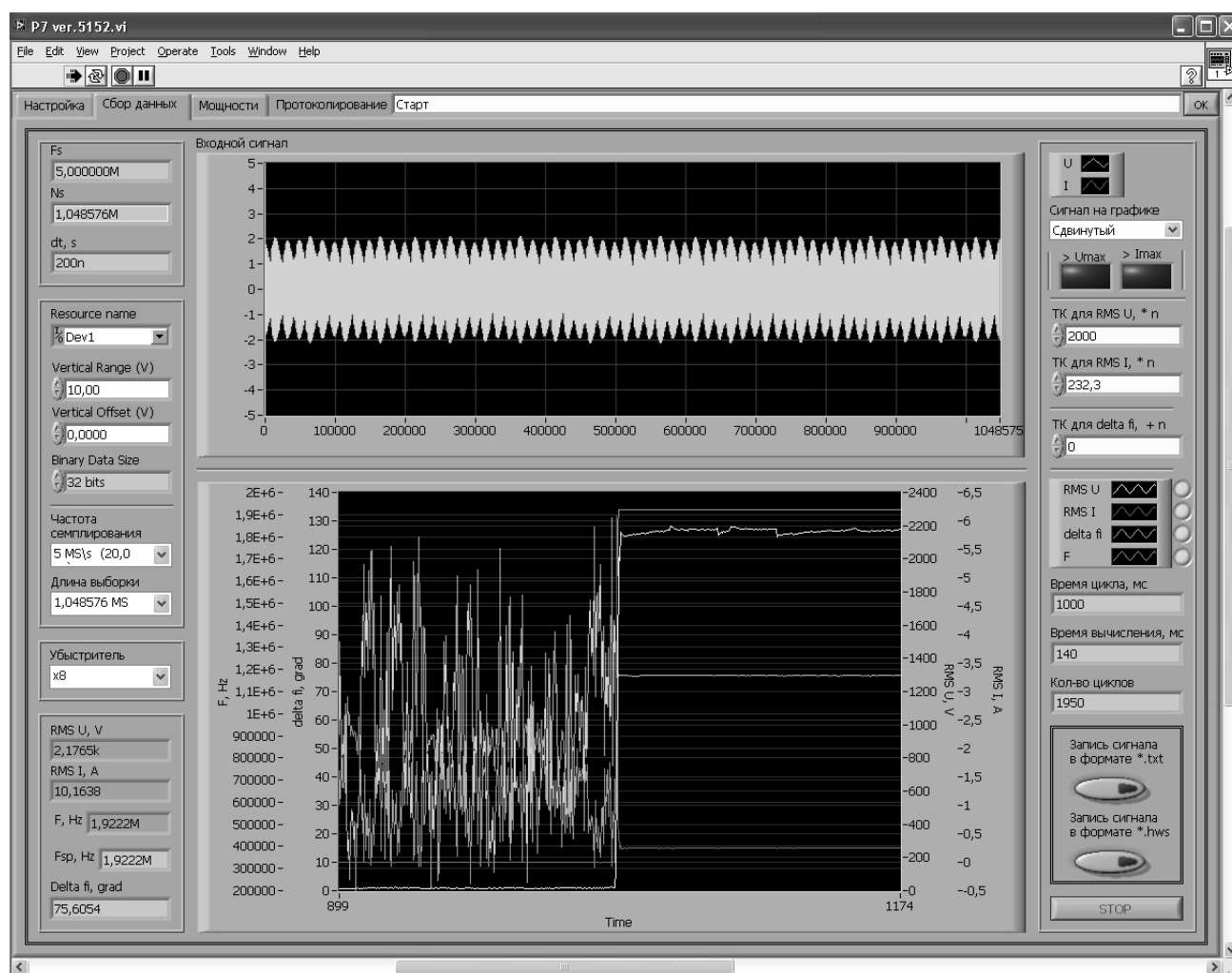


Рис. 4. Интерфейс программы «Phase»

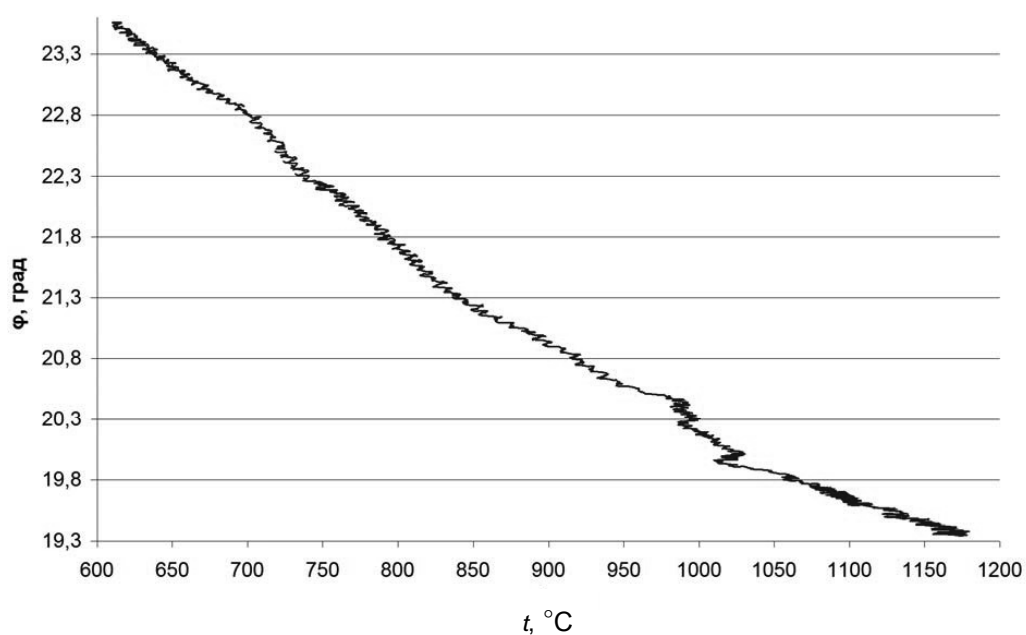
Рис. 5. Экспериментальная зависимость угла ϕ от температуры расплава боросиликатного стекла



Рис. 6. Установка для исследования остекловывания имитаторов радиоактивных отходов



Рис. 7. Высокопроизводительный сервер для функционирования программы «Phase»

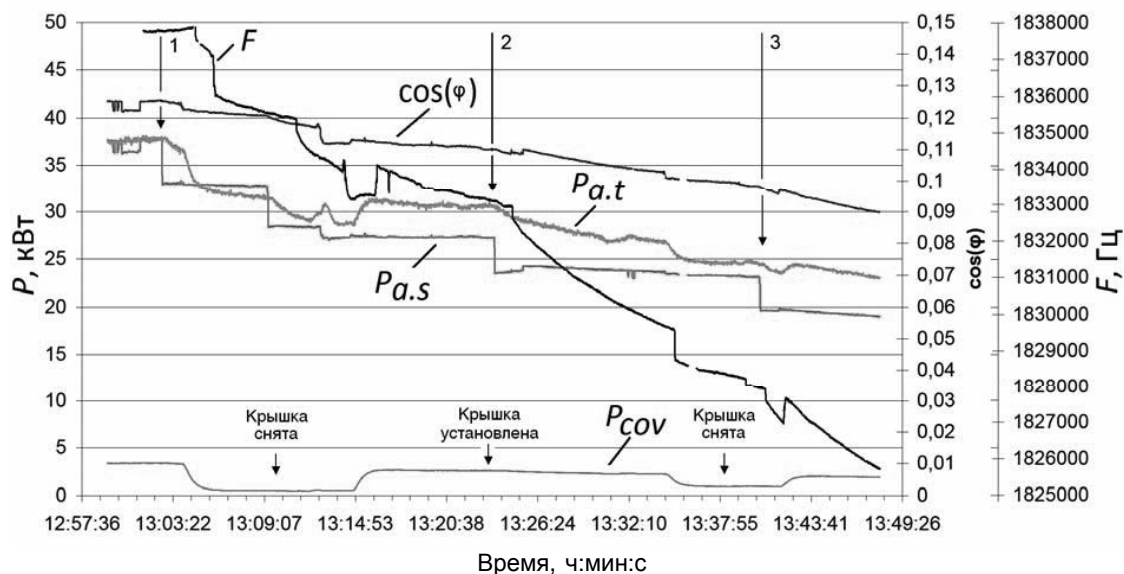


Рис. 8. Экспериментальные зависимости параметров плавки, полученные во время варки боросиликатного стекла при уменьшении температуры расплава

симый датчиками тока и напряжения индуктора, а также другими устройствами. Зависимость получена во время уменьшения мощности, выделяемой в расплаве. Основные флуктуации угла φ связаны с флуктуациями показаний пирометра, а угол φ практически линейно зависит от температуры расплава. Нелинейность в исследованном интервале температур не превышает 7 %.

Внедрение системы контроля. Система разработана и внедрена на кафедре электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ) СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». На рис. 6 показан объект контроля. Он представляет собой индукционную печь с холодным тиглем, используемую для исследования процесса остекловывания имитаторов радиоактивных отходов.

На рис. 7 изображён сервер, смонтированный с 19-дюймовой стойкой, на котором функционирует программа «Phase». С помощью комплекса проводятся исследования динамических характеристик плавки оксидов и стёкол в холодном тигле.

На рис. 8 приведены временные зависимости параметров плавки, полученные экспериментальным путём во время варки боросиликатного стекла, содержащего имитаторы радиоактивных отходов (цифрами 1, 2 и 3 отмечено время выхода на первый, второй и третий условно стационарные режимы плавки соответственно; $P_{a.s}$ – активная мощность индуктора, определённая по сигналам тока и напряжения индуктора, кВт; $P_{a.t}$ – активная мощность индуктора, определённая методом калориметрирования, кВт; P_{cov} – сумма тепловых и электрических потерь в крышке холодного тигля, кВт; $\cos(\varphi)$ – $\cos\varphi$ индуктора, вычисленный по сигналам тока и напряжения индуктора; F – частота тока индуктора, вычисленная по сигналам тока и напряжения индуктора). Значения параметров получены при уменьшении мощности, выделяемой в расплаве, с помощью регулятора анодного напряжения лампового генератора.

Как видно из рис. 8, разность мощностей $P_{a.s}$ и $P_{a.t}$ в конце условно стационарных режимов плавки уменьшается и составляет не более 12 %, но за счёт тепловой инерции ванны расплава эти значения значительно различаются при мгновенном изменении активной мощности, подводимой к индуктору. Со снижением температуры время выхода на стационарный режим увеличивается. Как видно из рис. 5 и 8, величины φ и $\cos\varphi$ индуктора отражают плавное изменение температуры расплава.

Частота тока индуктора не только отражает тепловое состояние нагрузки, но и мгновенно реагирует на изменение индуктивности нагрузки, например, увеличиваясь при установке крышки и уменьшаясь при её снятии (см. рис. 8).

Перспективы внедрения и развития системы. Разработанный комплекс планируется внедрить на предприятиях атомной промышленности России (МосНПО «Радон», ПО «Маяк») для контроля процессов остекловывания радиоактивных отходов методом ИПХТ, а также на установке

в айдахской национальной лаборатории США. Кроме того, разработанный комплекс будет интересен при плавке кориума для обоснования безопасности АЭС (НИТИ, г. Сосновый Бор), при получении штапельного волокна из горных пород для производства минеральной ваты, а также в процессах варки различных стёкол и плавки оксидов (частные фирмы России).

В настоящее время на базе данного программного обеспечения ведутся работы по разработке и изготовлению автоматизированной системы управления индукционной плавкой, что повысит надёжность ведения и управления ИПХТ, эффективность и рентабельность процесса. В частности, комплекс совершенствуется по следующим направлениям:

изучение параметров управления и поиск корреляционных зависимостей электрических и тепловых параметров плавки;

разработка алгоритмов управления ИПХТ.

Библиографические ссылки

1. Лопух Д.Б. Современные направления и новые результаты исследований индукционной плавки в холодных тиглях // Индукционный нагрев. 2008. № 6. С. 27–37.
2. **Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization** // J.A. Roach, D.B. Lopukh, A.P. Martynov, B.S. Plevodov, S.I. Chepluk // Waste Management Conference 2008 – Phoenix, AZ, February 27, 2008. С. 50.
3. **Вавилов А.В., Чеплюк С.И., Лопух Д.Б.** Разработка измерительного стенда для контроля и управления индукционной плавкой в холодном тигле // Тез. докл. на XIII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. 1–2 марта 2007 г., М., 2007. С. 161–162.
4. **Программно-аппаратный** информационно-измерительный комплекс для управления индукционной плавкой оксидов и стёкол / Д.Б. Лопух, А.П. Мартынов, С.И. Чеплюк, А.В. Вавилов, J. Roach, J. Richardson // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. № 4. С. 242–245.
5. **Суранов А.Я.** LabVIEW 7: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2005. 512 с.
6. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. С. 81–133.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 621.892:621.7/9-192

Ю.В. Полянсков, д-р техн. наук, проф., А.Н. Евсеев, канд. техн. наук, С.В. Емелин
(Ульяновский государственный университет)

contact@ulsu.ru

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрено поведение параметров смазочно-охлаждающей жидкости, в частности концентрации механических примесей, на основе анализа математических моделей её движения в заданной системе. Полученные результаты позволяют сократить себестоимость проектных работ, ускорить процесс проектирования систем применения смазочно-охлаждающих жидкостей, а также оптимизировать параметры работы таких систем (особенно централизованных и групповых).

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, механические примеси, концентрация.

Coolant parameters behavior, mechanical admixtures concentration in particular, is considered from a mathematical models analysis of the coolant movement in the specified system. Obtained results permit to reduce designing cost price, to accelerate designing of the coolant application systems, as well to optimize of the coolant system work (especially centralized and group).

Key words: coolant, mechanical admixtures, concentration.

Моделирование основано на уравнениях Навье—Стокса турбулентного движения жидкости [1, 2] и модели поведения концентрации механических примесей и эмульсола при движении смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Рассмотрим систему применения, состоящую из трубопроводов, которые занимают некую область пространства (обозначим её E); n емкостей, занимающих область пространства Θ_i ($i = 1, \dots, n$); m очистителей, ограниченных областями пространства Ψ_j ($j = 1, \dots, m$); а также включающую в себя p зон резания, которые можно ограничить областями пространства Λ_k ($k = 1, \dots, p$). Используя параметры, характеризующие поведение жидкости в каждом элементе системы (коэффициент седиментации, степень очистки, расход, скорость поступления механических примесей), известные уравнения турбулентного движения жидкости (Навье—Стокса) [1, 2] и проделав соответствующие математические преобразования, получаем систему уравнений описывающих поведение концентрации механических примесей СОЖ при её движении в некоторой абстрактной системе применения (состоящей из трубопроводов, зон резания, ёмкостей, очистителей):

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t)(\nabla \bar{v} + (\nabla \bar{v})^T)) + \bar{F};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bar{v} = 0;$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon};$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\bar{v}k) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \nabla k) + \frac{G}{\rho} - \varepsilon;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\bar{v}\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 \varepsilon);$$

$$G = \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} (\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i});$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \nabla C = -\mu C, \text{ для } x, y, z \in E;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \nabla C = -\varepsilon_i' C, \text{ для } x, y, z \in \Theta_i, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \nabla C = -\varepsilon_j'' \frac{Q_j}{V_{\text{оч}j}} C, \text{ для } x, y, z \in \Psi_j, j = 1, 2, \dots, m;$$

$$C_{k2} = C_{k1} + \frac{v_{\text{ш}k}}{\rho Q_k}, \text{ для } x, y, z \in \Lambda_k, k = 1, 2, \dots, p;$$

$$\varepsilon_j'' \frac{Q_j}{V_{\text{оч}j}} = \mu', \text{ для } x, y, z \in E \cap \Psi_j, j = 1, 2, \dots, m;$$

$$\varepsilon_i' = \mu', \text{ для } x, y, z \in E \cap \Theta_i, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \nabla C = -\mu' C \text{ и } C_{k2} = C_{k1} + \frac{v_{\text{ш}k}}{\rho Q_k},$$

$$\text{для } x, y, z \in E \cap \Lambda_k, k = 1, 2, \dots, p,$$

где первые шесть уравнений (уравнения Навье–Стокса, неразрывности, коэффициента турбулентной вязкости, турбулентной энергии, скорости диссипации) описывают турбулентное движение СОЖ, следующие четыре – поведение концентрации механических примесей в трубопроводах, баках, очистителях и зонах резания соответственно, следующие три – накладывают условия сопряженности соседних элементов системы применения для модели концентрации механических примесей; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; ϵ'_i – коэффициент седиментации в i -м баке; Θ_i – область пространства, ограниченная i -м баком; ϵ''_j – степень очистки j -го очистителя; Q_j – расход j -го очистителя; $V_{очj}$ – объем j -го очистителя; Ψ_j – область пространства, ограниченная j -м очистителем; $v_{шк}$ – скорость поступления механических примесей в k -й зоне резания; $V_{зрк}$ – объем СОЖ в k -й зоне резания; Λ_k – область пространства, ограниченная k -й зоной резания; C_{k1} – концентрация примесей до k -й зоны резания; C_{k2} – концентрация примесей после прохождения k -й зоны резания; Q_k – расход СОЖ в k -й зоне резания.

Решение полученной системы уравнений находится с помощью метода конечных элементов [3] и приводится к линейным системам вида:

$$Ax = b,$$

$$\text{где } A = (M + \frac{N}{\Delta t}), \quad b = F + \frac{N}{\Delta t} C^n, \quad x = C^{n+1},$$

N , M , F – рассчитанные матрицы; $C(t)$ – вектор узловых значений концентрации механических примесей; Δt – временной интервал; C^{n+1} – значение вектора $C(t)$ в момент $(n+1)\Delta t$; C^n – значение векто-

ра $C(t)$ в момент $n\Delta t$. При этом A , в силу своего построения, является разреженной и симметричной матрицей. В качестве конечного элемента был выбран линейный тетраэдр.

Для оценки полученного решения и соответственно модели поведения концентрации механических примесей СОЖ при её движении в системе применения была изготовлена в заводских условиях экспериментальная установка, эксперименты на которой в лабораторных условиях позволили сделать выводы об адекватности полученной модели.

Установка, созданная для моделирования движения и очистки СОЖ, состоит из бака-отстойника, гидроциклона 100ГЦ-20, насоса К65-50-160, вентиля, манометров избыточного давления, устройств для забора проб СОЖ, системы трубопроводов (рис. 1). Параметры насоса К65-50-160: расход – 20 м³/ч; высота всасывания – 30 м; мощность – 4 кВт; частота вращения – 2900 мин⁻¹. Графическая модель установки, которая использовалась при расчёте методом конечных элементов, представлена на рис. 2.

Для анализа концентрации механических примесей в пробах СОЖ использовалось устройство для фотометрического анализа концентрации механических примесей в СОЖ (ПКП СОЖ-2) [4]. Прибор отвечает требованиям для использования его в системах прогнозирующего контроля и в качестве датчика в системах управления параметрами СОЖ. Данный прибор позволяет производить массовое измерение гранулометрического

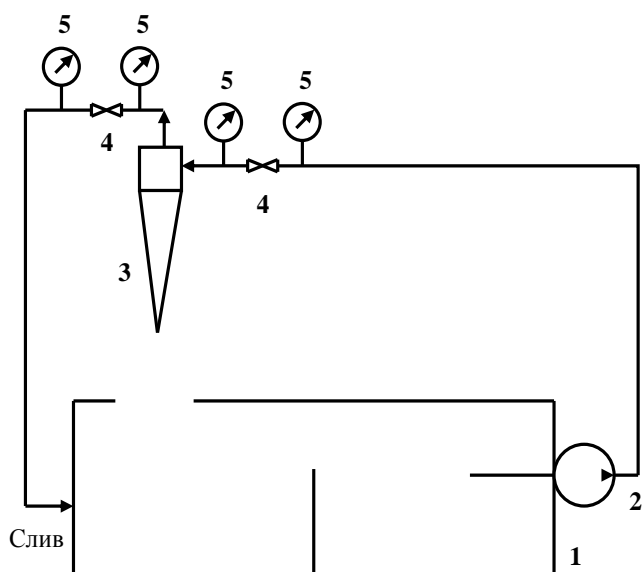


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – бак-отстойник для СОЖ; 2 – насос К65-50-160; 3 – гидроциклон 100ГЦ-20; 4 – вентили; 5 – манометры избыточного давления

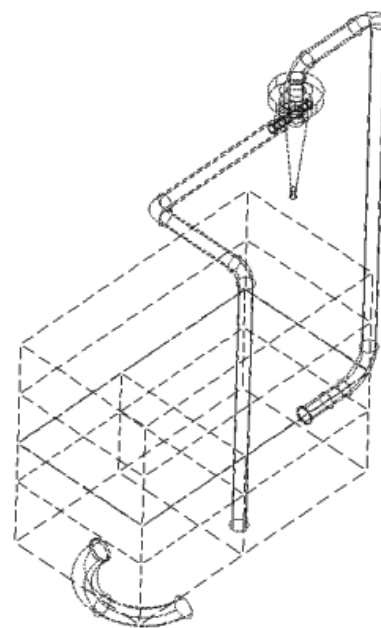


Рис. 2. Графическая модель экспериментальной установки

состава в различных СОЖ, используя методику фотоседиментационного анализа.

В процессе экспериментальных исследований было произведено около 100 замеров концентрации механических примесей. На основании статистического анализа по критерию Пирсона, определения доверительных интервалов для математического ожидания и дисперсии отклонений, рассчитанной по модели концентрации механических примесей от реальных значений, можно с уверенностью сказать, что математическая модель адекватна при уровне значимости 0,80.

Библиографические ссылки

1. **Launder B.E., Spalding D.B.** The Numerical Computation of Turbulent Flows. Vol. 3, 1974.
2. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика: Учеб. пос. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
3. **Сегерлинд Л.Д.** Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
4. **А.С. №1509619 (СССР).** Ю.В. Полянсков, А.Н. Евсеев, В.А. Кукушкин. Устройство для фотометрического анализа концентрации механических примесей в СОЖ. 1989. № 35. Дата приоритета от 7.04.87.

УДК 517.977.55

Е.И. Веремей, д-р физ.-мат. наук, проф.
(Санкт-Петербургский государственный университет)

e_veremey@mail.ru

АЛГОРИТМ ПОДХОДА К РЕДУКЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассмотрена задача аналитического синтеза линейных обратных связей, обеспечивающих наилучшее подавление возмущающих гармонических сигналов с учётом комплекса требований к динамике замкнутой системы. Предложен спектральный подход к её решению, позволяющий находить оптимальные регуляторы специализированной легко реализуемой структуры. В результате получен простой расчётный алгоритм, не требующий больших затрат времени и оперативной памяти, что имеет особое значение для автоматической адаптивной перенастройки при работе системы в режиме реального времени.

Ключевые слова: гармонические возмущения, среднеквадратичный синтез, обратная связь, оптимизация.

Analytic synthesis task of the linear back connections that provides the best suppression of the harmonious disturbance signals taking into account the objectives to enclose system dynamics is considered. Spectral approach to the task decision that allows to find optimal regulator for special lightly implemented structure is proposed. As a result simple calculating algorithm is derived, which not is demanding large time and working storage. It is of particular importance for automatic adaptive reconfiguration for system work in regime of real time.

Key words: harmonious disturbance, mean-square synthesis, back connections, optimization.

Введение. При создании современных систем промышленной автоматики, управления подвижными объектами, различных устройств, встраиваемых в бытовые приборы часто возникает необходимость динамического подавления колебаний заданных частот в составе определённых сигналов. Этот вопрос легко решается методами теории фильтрации в тех случаях, когда эти сигналы не используются в контурах обратной связи, что допускает достаточную свободу их обработки. В противном случае для подавления колебаний необходим учёт динамики всех элементов контура с обеспечением устойчивости и тех неизбежных ограничений, которые определяются

энергетическими возможностями применяемых средств.

Одним из современных подходов к решению проблемы является привлечение методов теории среднеквадратичного синтеза, которая в настоящее время трактуется как частный вариант теории оптимизации по нормам пространств Харди H_2 и H_∞ . Соответствующие методы получили развитие на базе специально разработанной спектральной формы представления оптимальных регуляторов [1–3].

Новые средства синтеза исходно ориентированы на современные компьютерные технологии как для автоматизации проектирования, так и для

реализации синтезируемых обратных связей в режиме реального времени. Особую роль играет поиск оптимальных решений на особых множествах регуляторов [4], обеспечивающий их многоцелевую ориентацию.

Данная работа посвящена применению новых методов среднеквадратичного синтеза для решения задачи о наилучшем подавлении гармонических помех. При этом используются обратные связи специализированной структуры, обеспечивающие желаемые динамические свойства замкнутой системы.

Предлагаемый подход позволяет уменьшить время вычислений и объём оперативной памяти цифровых устройств, что имеет особую значимость при реализации расчётного алгоритма синтеза для автоматической адаптивной перенастройки систем, работающих в режиме реального времени.

Задача среднеквадратичного синтеза. Базовая задача, на которой основан предлагаемый подход, формулируется для объекта управления, представленного линейной моделью

$$A(p)y = pB(p)u + d(t), \quad (1)$$

где y , u и d – скалярные величины (y – управляемая переменная, u – управление, d – внешнее возмущение); $A(p)$, $B(p)$ – взаимно простые полиномы степеней n и $m \leq n-1$ от оператора $p = d/dt$ дифференцирования.

Будем замыкать объект (1) регулятором

$$u = W(p)y, \quad (2)$$

где $W(p) = W_1(p)/W_2(p)$, W_1 , W_2 – полиномы.

Математической моделью замкнутой системы уравнений (1) и (2) с одним входом и одним выходом служит уравнение

$$[A(p) - B(p)W(p)]y = d,$$

где возмущение $d = d(t)$ – случайный эргодический стационарный процесс с заданной спектральной плотностью мощности $S_d(\omega)|_{\omega = -js}$.

В свою очередь,

$$S_d(\omega)|_{\omega = -js} \equiv S_1(s)S_1(-s),$$

$$S_1(s) \equiv N(s)/T(s), \quad (3)$$

где $N(s)$ и $T(s)$ – гурвицевы полиномы.

Классическая задача среднеквадратичного синтеза состоит в поиске такого стабилизирующего регулятора (2), который минимизирует функционал

$$I = I(W) = \langle y^2 \rangle + k^2 \langle u^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [y^2(t) + k^2 u^2(t)] dt, \quad (4)$$

заданный на движениях замкнутой системы уравнений (1) и (2), $k = \text{const}$.

Подробное рассмотрение вопросов, связанных с решением данной задачи, осуществлено в работах [1, 2]. Здесь приведём лишь краткую схему построения решения, отметив, что в её основе лежит параметризация множества стабилизирующих регуляторов функциями:

$$\Phi(s) = \alpha(s)H_y(s) + \beta(s)H_u(s) \quad (5)$$

где $\alpha(s)$ и $\beta(s)$ – любые полиномы, для которых является гурвицевым полином

$$Q(s) = A(s)\beta(s) + B(s)\alpha(s), \quad (6)$$

H_y и H_u – передаточные функции замкнутой системы уравнений (1) и (2).

Отметим, что формулы (5) и (6) дают взаимно однозначную связь между параметрами $\Phi(s)$ и передаточными функциями $W(s)$ регуляторов (2):

$$W = \frac{A\Phi - \alpha}{B\Phi + \beta}, \quad \Phi = \frac{\alpha + \beta W}{A - BW}, \quad (7)$$

которая трансформирует задачу к эквивалентному поиску оптимального параметра Φ .

При этом нетрудно показать, что явная зависимость $I(\Phi)$ представляется формулой (черта над функцией здесь и далее обозначает замену знака аргумента на обратный)

$$I = I(\Phi) = \frac{1}{j\pi} \int_0^\infty (T_1 - T_2\Phi)(\bar{T}_1 - \bar{T}_2\bar{\Phi})S_d ds + \frac{1}{j\pi} \int_0^\infty T_3S_d ds, \quad (8)$$

где использованы вспомогательные функции

$$T_1(s) = \frac{k^2\alpha(s)A(-s) - \beta(s)B(-s)}{Q(s)G(s)},$$

$$T_2(s) = \frac{G(-s)}{Q(s)}, \quad T_3(s) = \frac{k^2}{G(s)G(-s)}, \quad (9)$$

причём гурвицев полином $G(s)$ является результатом факторизации

$$k^2 A(s)A(-s) + B(s)B(-s) \equiv G(s)G(-s). \quad (10)$$

Обратим внимание на то, что в формуле (8) от искомого параметра зависит лишь первый интеграл, что сводит задачу к поиску его минимума. Поскольку изначально речь идёт о поиске стабилизирующего регулятора, этот минимум должен обеспечиваться только функциями с гурвицевыми знаменателями. Учёт этого требования, как показано в работе [2], приводит к следующему алгоритму построения оптимального регулятора.

1. В качестве исходных данных принять полиномы A и B в модели (1), гурвицевы полиномы N и T в спектре (3), а также значение k веса в функционале (4).

2. Выполнить факторизацию (10), формируя гурвицев полином $G(s)$.

3. Построить вспомогательный полином $R(s)$ по формуле

$$R(s) = \sum_{i=1}^n \frac{G(-s)}{g_i - s} \frac{B(-g_i)N(g_i)}{A(g_i)T(g_i)G'(-g_i)}, \quad (11)$$

где $G'(-g_i) = dG(-s)/ds|_{s=g_i}$; $g_i (i = \overline{1, n})$ – простые корни полинома $G(-s)$.

4. Сформировать числитель $W_{01}(s)$ и знаменатель $W_{02}(s)$ передаточной функции $W_0(s) = W_{01}(s)/W_{02}(s)$ оптимального регулятора по формулам

$$W_{01}(s) = \frac{A(s)T(s)R(s) + B(-s)N(s)}{G(-s)},$$

$$W_{02}(s) = \frac{B(s)T(s)R(s) - k^2 A(-s)N(s)}{G(-s)}, \quad (12)$$

где деление на полином $G(-s)$ выполняется нацело (без остатка).

Для реализации вычислений в соответствии с операциями (10)–(12) удобно использовать среду MATLAB.

Данный алгоритм исчерпывающим образом решает общую задачу среднеквадратичного синтеза в приведённой постановке. Однако представление минимизируемого функционала в виде формулы (8) позволяет рассмотреть одну важнейшую особенность задачи, имеющую принципиальное значение для частной ситуации с гармоническими возмущениями.

Особенность состоит в том, что если отказаться от учёта требования устойчивости, то на осно-

вании уравнений (8) и (9) легко найти функцию $\tilde{\Phi} = (k^2 \alpha \bar{A} - \beta \bar{B}) / G \bar{G}$, обращающую первый интеграл в ноль, что в соответствии с выражениями (7) приводит к тривиальному решению

$$\tilde{W}(s) = -\frac{B(-s)}{k^2 A(-s)},$$

$$I_a = I(\tilde{W}) = \int_0^\infty \frac{k^2 S_d(\omega)}{|G(j\omega)|^2} d\omega. \quad (13)$$

Это решение было впервые получено в работе [5] и названо её автором *абсолютным минимумом среднеквадратичного функционала*.

Среднеквадратичная оптимизация для гармонических возмущений. Отметим, что реализация решения (13) с помощью регулятора (2), имеющего передаточную функцию $\tilde{W}(s)$, невозможна, поскольку замкнутая им система не будет устойчивой. Однако практическое значение введённого понятия абсолютного минимума прежде всего определяется тем обстоятельством, что величина I_a в соответствии с формулой (8) является легко вычисляемой нижней оценкой для минимума $I = I_0$ функционала (4), достигаемого с помощью стабилизирующих регуляторов.

Однако этим не исчерпывается значение введённого понятия. В частной ситуации с гармоническим возмущением, которой посвящена данная статья, величина I_a среднеквадратичного функционала *может достигаться* на множестве регуляторов, обеспечивающих устойчивость замкнутой системы. Докажем это важнейшее утверждение.

По-прежнему будем рассматривать объект управления с моделью (1), но предположим, что возмущением служит гармоническое колебание

$$d(t) = d_h(t) = A_h \sin \omega_0 t, \quad (14)$$

имеющее единичную дисперсию $D_h = A_h^2 / 2 = 1$, т. е. $A_h = \sqrt{2}$. Из теории случайных процессов известно, что спектральной плотностью мощности такого возмущения служит δ -функция на частоте ω_0 :

$$S_h(\omega) = \delta(\omega - \omega_0). \quad (15)$$

Подобное возмущение выходит за пределы вопросов, рассмотренных в предшествующем разделе, поскольку его спектр $S_h(\omega)$ не принадлежит классу чётных дробно-рациональных функций. Тем не менее в данном случае может быть поставлена задача

$$I(W) \rightarrow \min_{W \in \Omega^*} \quad (16)$$

о поиске минимума среднеквадратичного функционала (4), заданного на движениях замкнутой системы уравнений (1) и (2) при условии (14), где дисперсии переменных определяются через их амплитуды по формулам $\langle y^2 \rangle = A_y^2 / 2$ и $\langle u^2 \rangle = A_u^2 / 2$. Множество Ω^* – это совокупность регуляторов, обеспечивающих гурвицевость характеристического полинома $\Delta(s) = A(s)W_2(s) - B(s)W_1(s)$ замкнутой системы.

Для решения поставленной задачи привлечём приведённый выше спектральный метод среднеквадратичного синтеза, несмотря на особую ситуацию с возмущением. С этой целью воспользуемся тем фактом, что спектральная плотность (15) может быть представлена в виде предела, к которому стремятся дробно-рациональные функции некоторого специально построенного однопараметрического семейства.

Указанное семейство сформируем на базе частной спектральной плотности

$$S_d(\omega, \gamma) = \frac{4\alpha}{\pi} \frac{\alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)^2 - 4\beta^2\omega^2}, \quad (17)$$

где $\alpha = \gamma\beta$, $\gamma > 0$ – положительный вещественный параметр, $\beta = \omega_0$ – средняя частота спектра.

В гидродинамике функция $S_d(\omega, \gamma)$ служит одним из вариантов спектрального представления морского волнения (спектр Рахманина–Фирсова).

Нетрудно убедиться, что возмущение со спектром (17) имеет единичную дисперсию, независимо от значения параметра γ . При этом видно, что с уменьшением данного параметра максимум спектра приближается к значению частоты $\omega = \beta = \omega_0$, а сам спектр сжимается по ширине и увеличивается по высоте, сохраняя единичную площадь.

Легко доказать, что в пределе справедливо равенство

$$S_h(\omega) = \delta(\omega - \omega_0) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} S_d(\omega, \gamma), \quad (18)$$

из которого следует, что поставленная задача (16) может быть решена для спектральной плотности (17) с последующим предельным переходом при условии $\gamma \rightarrow 0$.

Поскольку спектральная плотность (17) принадлежит классу чётных дробно-рациональных функций, то для решения задачи может быть привлечён приведённый выше алгоритм. Опуская постоянный множитель, выполним факторизацию функции $S_d(\omega, \gamma)$ по формуле (3), получая при этом

$$S_I(s) * N(s) / T_{h1}(s), N_h(s) \equiv 1, T_{h1}(s, \gamma) = s^2 + 2\alpha s + \beta^2. \quad (19)$$

Учитывая необходимость дальнейшего выполнения предельного перехода (18) при условии $\gamma \rightarrow 0$, в соответствии с выражением (19) найдём $T_h(s) = \lim T_{h1}(s, \gamma) = \lim (s^2 + 2\alpha s + \beta^2) = s^2 + \beta^2$. Тогда для поиска оптимального регулятора, являющегося решением задачи (16), можно воспользоваться представленным выше алгоритмом, используя при синтезе полиномы $N(s) = N_h(s)$ и $T(s) = T_h(s)$.

В соответствии с операциями алгоритма получим передаточную функцию оптимального регулятора

$$W_h(s) = W_{h1}(s) / W_{h2}(s), \quad (20)$$

$$\text{где } W_{h1}(s) = \frac{A(s)T_h(s)R_h(s) + B(-s)}{G(-s)};$$

$$W_{h2}(s) = \frac{B(s)T_h(s)R_h(s) - k^2 A(-s)}{G(-s)};$$

$$R_h(s) = \sum_{i=1}^n \frac{G(-s)}{g_i - s} \frac{B(-g_i)}{A(g_i)(g_i^2 + \beta^2)G'(-g_i)}. \quad (21)$$

Нетрудно проверить, что регулятор с передаточной функцией $W_h(s)$ даёт устойчивый характеристический полином $\Delta(s) = -G(s)$.

Теперь определим значение функционала (4), которое обеспечивает найденный оптимальный регулятор. С этой целью воспользуемся формулами

$$I_{hy} = I(W_h) = \int_0^\infty |H_h(j\omega)|^2 S_d(\omega, \gamma) d\omega =$$

$$= \frac{1}{j} \int_0^{j\infty} H_h(s) \bar{H}_h(-s) S_d(s, \gamma) ds, \quad (22)$$

где $H_h \bar{H}_h = H_{hy}(s) H_{hy}(-s) + k^2 H_{hu}(s) H_{hu}(-s)$, $H_{hy}(s) = W_{h2}(s) / \Delta(s)$ и $H_{hu}(s) = W_{h1}(s) / \Delta(s)$ – передаточные функции оптимальной замкнутой системы.

Согласно выражениям (20) и (22) имеем

$$I_{hy} = \frac{1}{j} \int_0^{j\infty} H_h \bar{H}_h S_d ds = \frac{1}{j} \int_0^{j\infty} \frac{T_h R_h \bar{T}_h \bar{R}_h + k^2}{G \bar{G}} S_d d =$$

$$= \int_0^\infty \frac{|T_h(j\omega) R_h(j\omega)|^2}{|G(j\omega)|^2} S_d(\omega, \gamma) d\omega + \int_0^\infty \frac{k^2 S_d(\omega, \gamma)}{|G(j\omega)|^2} d\omega.$$

Осуществим предельный переход в полученной формуле при условии $\gamma \rightarrow 0$ с учётом условий $T_h(j\beta) = -\beta^2 + \beta^2 = 0$, $G(j\beta) \neq 0$, получая при этом минимальное значение функционала (4), которое достигается с помощью оптимального регулятора

$$I_h = \lim_{\gamma \rightarrow 0} I_{h\gamma} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \int_0^{\infty} \frac{k^2 S_d(\omega, \gamma)}{|G(j\omega)|^2} d\omega = \frac{k^2}{|G(j\omega_0)|^2}. \quad (23)$$

Однако это значение функционала, как следует из формулы (13), является его абсолютным минимумом при данном возмущении. Отсюда следуют два важнейших вывода:

если возмущающее воздействие является гармоническим колебанием, то абсолютный минимум I_a среднеквадратичного функционала *достигим* на множестве регуляторов, обеспечивающих устойчивость замкнутой системы;

на множестве регуляторов с произвольными дробно-рациональными передаточными функциями решение задачи (16) с данным возмущением *является не единственным*. Действительно, уже указаны два регулятора, дающие одно и то же оптимальное значение (23) функционала (4) – с передаточной функцией (13) и с передаточной функцией (20).

Второй вывод позволяет отметить следующую особенность указанных регуляторов: оказывается, что справедливо равенство

$$\tilde{W}(j\omega_0) = W_h(j\omega_0), \quad (24)$$

т. е. на частоте возмущающих колебаний, для которой осуществляется оптимизация, комплексные частотные характеристики регуляторов совпадают. Равенство (24) доказывается непосредственной подстановкой выражения $s = j\omega_0$ в формулы (13), (20) и (21) с учётом равенства $T_h(j\omega_0) = 0$.

В связи со вторым выводом возникает естественный вопрос: является ли единственным решением задачи на множестве Ω^* , т. е. среди стабилизирующих регуляторов? Иными словами, существует ли регулятор, отличный от построенного, который наряду с устойчивостью даёт такое же значение функционала для замкнутой системы.

Положительный ответ на этот вопрос будет дан ниже, а здесь лишь отметим следующее. Предположим, что решение задачи (16) на множестве Ω^* является не единственным. Следовательно, для

любого оптимального регулятора передаточной функцией $W^*(s)$ на основании выражений (22) и (23) выполняется равенство $I(W^*) = |Hy^*(j\omega_0)|^2 + k^2 |Hu^*(j\omega_0)|^2 = k^2 / |G(j\omega_0)|^2$.

Поскольку соответствующие передаточные функции замкнутой системы имеют вид

$$H_y^*(s) = 1 / [A(s) - B(s)W^*(s)],$$

$$H_u^*(s) = W^*(s) / [A(s) - B(s)W^*(s)],$$

это равенство можно трактовать как уравнение относительно комплексного числа $W^*(j\omega_0)$, которое с учётом выражения (10) имеет единственное решение

$$W^*(j\omega_0) = -\frac{B(-j\omega_0)}{k^2 A(-j\omega_0)}. \quad (25)$$

Итак, для того чтобы некоторый регулятор из множества Ω^* был решением оптимизационной задачи (16), необходимо и достаточно, чтобы он одновременно обеспечивал устойчивость замкнутой системы и удовлетворял условию (25).

Оптимальные регуляторы со специализированной структурой. Выше было предложено решение задачи синтеза для системы, подверженной воздействию гармонического возмущения, в виде регулятора с передаточной функцией (20). Однако такие регуляторы обладают рядом недостатков [6, 7]: неправильность передаточной функции $W_h(s)$, плохие робастные свойства, возможная неустойчивость регулятора и отсутствие астатизма замкнутой системы.

Однако, как было показано, регулятор $u = W_h(s)y$ не является единственным решением задачи (16), что позволяет ставить вопрос о поиске более удачного варианта. В качестве такого варианта построим регулятор специализированной структуры, который свободен от указанных выше недостатков.

Для введения специализированной структуры будем считать, что сформирована минимальная реализация в пространстве состояний по отношению к уравнению (1)

$$\dot{x} = A_x x + bu + hd(t);$$

$$y = cx, \quad (26)$$

где $x \in E^n$ – вектор состояния объекта; A_x , b , h и c – матрицы соответствующей размерности с постоянными компонентами, удовлетворяющие тождествам

$$\begin{aligned}\det(Es - A_x) &\equiv A(s), c(Es - A_x)^{-1}b \equiv B(s), \\ c(Es - A_x)^{-1}h &\equiv 1.\end{aligned}\quad (27)$$

Предлагаемая структура закона управления с учётом выражения (26) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{z} &= A_x z + bu + g(y - cz); \\ u &= k_z z + \xi; \\ \xi &= F(p)(y - cz).\end{aligned}\quad (28)$$

Здесь первое уравнение представляет собой асимптотический наблюдатель, где $z \in E_n$ – вектор оценок состояния объекта; g – вектор-столбец коэффициентов наблюдателя, обеспечивающий гурвицевость его характеристического полинома $A_g(s) = \det(Es - A_x + gc)$. Второе уравнение определяет базовый закон управления, где вектор-строка k_z обеспечивает гурвицевость характеристического полинома $\Delta_0(s) = \det(Es - A_x - bk_z)$ системы (26), замкнутой регулятором $u = k_z x$ по состоянию. И, наконец, третье уравнение служит математической моделью *динамического корректора*, роль которого заключается в обеспечении желаемой реакции замкнутой системы на воздействие возмущений.

Далее векторы k_z и g с указанными свойствами будем считать заданными исходя из требований к собственной динамике замкнутой системы при отсутствии возмущений, а передаточную функцию $F(s)$ корректора будем трактовать как варьируемый элемент.

Покажем, что эту функцию всегда можно выбрать так, что регулятор (28) будет решением задачи (16). Для нахождения такой функции $F = F_0(s)$ прежде всего отметим основную особенность предлагаемой структуры, связанную с известными свойствами асимптотических наблюдателей. Она состоит в том, что замкнутая система уравнений (1) и (28) является устойчивой для любой функции $F(s)$, все полюсы которой расположены в открытой левой полуплоскости. Это утверждение доказывается видом характеристического полинома рассматриваемой замкнутой системы:

$$\begin{aligned}\Delta(s) &= \begin{vmatrix} Es - A_x & 0 & -b \\ -gc & Es - A_x + gc & -b \\ -N_c(s)c & -k_z \Delta_c(s) + N_c(s)c & \Delta_c(s) \end{vmatrix} = \\ &= A_g(s) \Delta_c(s) \Delta_0(s),\end{aligned}\quad (29)$$

где $N_c(s)$ и $\Delta_c(s)$ – числитель и знаменатель передаточной функции $F(s)$ соответственно.

Обратим особое внимание на то, что из формулы (29) следует полная независимость полинома $\Delta(s)$ от числителя передаточной функции динамического корректора.

Учитывая отмеченную особенность регуляторов со структурой (28), можно утверждать, что любой из них будет решением задачи (16), если передаточная функция F корректора согласно выражению (25) обеспечивает выполнение равенства

$$W(j\omega_0, F(j\omega_0)) = \rho, \quad (30)$$

где $\rho = -\frac{B(-j\omega_0)}{k^2 A(-j\omega_0)}$ для передаточной функции $W(s)$ регулятора.

Это равенство следует трактовать как уравнение относительно неизвестного числа $F(j\omega_0)$, причём его решение нетрудно найти, записывая функцию W в явной зависимости от функции F . Такую зависимость легко получить, трактуя уравнения регулятора (28) как результат замыкания вспомогательного объекта управления, определяемого основной частью регулятора, локальной обратной связью, представляемой динамическим корректором.

Основная часть регулятора является линейной стационарной системой со входом $(y, \xi)'$, вектором состояния z и выходом $(u, \zeta)'$, определяемой уравнениями пространства состояний

$$\begin{aligned}\dot{z} &= (A_x - gc + bk_z)z + gy + b\xi; \\ u &= k_z z + \xi; \\ \zeta &= y - cz\end{aligned}$$

или соответствующим соотношением «вход-выход»

$$\begin{pmatrix} u \\ \zeta \end{pmatrix} = T_z(s) \begin{pmatrix} y \\ \xi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11}(s) & T_{12}(s) \\ T_{21}(s) & T_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \xi \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Далее будем считать, что дробно-рациональные функции T_{11}, T_{12}, T_{21} и T_{22} – однозначно определяемые компоненты матрицы $T_z(s)$ – известны.

Рассматривая систему (31) как заданный объект управления, замкнём её корректором как локальным регулятором и найдём передаточную функцию полного регулятора (28):

$$\begin{aligned}W(s) &= T_{11}(s) + T_{12}(s)F(s)[1 - \\ &- T_{22}(s)F(s)]^{-1}T_{21}(s).\end{aligned}$$

Теперь учтём равенство (30) и непосредственно находим

$$F(j\omega_0) = f_0 = (\rho - T_{11}(j\omega_0))/(T_{12}(j\omega_0)T_{21}(j\omega_0) - T_{11}(j\omega_0)T_{22}(j\omega_0) + \rho T_{22}(j\omega_0)), \quad (32)$$

если выполняются условия

$$\begin{aligned} T_{12}(j\omega_0) \neq 0; T_{21}(j\omega_0) \neq 0 \text{ и} \\ T_{12}(j\omega_0)T_{21}(j\omega_0) - T_{11}(j\omega_0)T_{22}(j\omega_0) + \\ + \rho T_{22}(j\omega_0) \neq 0. \end{aligned} \quad (33)$$

И, наконец, покажем, что найдётся такая дробно-рациональная функция $F(s)$ с гурвицевым знаменателем, которая удовлетворяет условию (32). С этой целью зададим произвольный гурвицев квадратный трёхчлен $\Delta_c(s) = s^2 + \beta_1 s + \beta_0$ и введём передаточную функцию динамического корректора $F_0(s) = N_c(s)/\Delta_c(s)$, где $N_c(s) = \alpha_1 s + \alpha_0$. Осуществим выбор действительных чисел α_1 и α_0 , обеспечивая выполнение равенства

$$F_0(j\omega_0) = \frac{N_c(j\omega_0)}{\Delta_c(j\omega_0)} = f_0, \quad (34)$$

где комплексное число f_0 определяется формулой (32).

С этой целью введём обозначение $\Delta_c(j\omega_0) = g_0$ и в соответствии с выражением (34) получим равенство $\alpha_1 j\omega_0 + \alpha_0 = f_0 g_0$, из которого следует, что $\alpha_0 = \operatorname{Re} f_0 g_0$, $\alpha_1 = \operatorname{Im} f_0 g_0 / \omega_0$.

В итоге сформирован регулятор (28) с корректором, имеющим передаточную функцию $F_0(s) = (\alpha_1 s + \alpha_0)/(s^2 + \beta_1 s + \beta_0)$, причём для любых $\beta_1 > 0$ и $\beta_2 > 0$ и для найденных чисел α_0 и α_1 этот регулятор обеспечивает устойчивость замкнутой системы и удовлетворяет условию (25), т. е. является решением исходной оптимизационной задачи (16).

Приведённые рассуждения позволяют сформировать алгоритм решения задачи (16) о поиске минимума среднеквадратичного функционала при наличии гармонических возмущений с использованием регуляторов специализированной структуры. В качестве исходных данных принимаются полиномы $A(s)$ и $B(s)$ в уравнении (1) объекта управления, а также весовой множитель k в функционале (4) и частота ω_0 гармонического возмущения (14).

Для построения регулятора (28) необходимо выполнить следующие операции:

найти числовые матрицы A_x , b и c в соответствии с формулами (27) и определить комплексное число по формуле (30);

исходя из требований к динамике собственного движения при условиях $d(t) \equiv 0$ и $F(p) \equiv 0$, задать вектор k_z в уравнениях регулятора (28), а вектор g выбрать, обеспечивая желаемую динамику при действии возмущения $d(t) \equiv d_0 = \text{const}$;

сформировать передаточную матрицу $T_z(s)$ локального объекта управления (31), разбивая её на скалярные блоки T_{11} , T_{12} , T_{21} и T_{22} ;

если выполняются условия (33), определить по формуле (32) комплексное число $F(j\omega_0) = f_0$ для передаточной функции корректора в комплексной точке $s = j\omega_0$;

задать произвольный квадратный трёхчлен $\Delta_c(s) = s^2 + \beta_1 s + \beta_0$ с положительными коэффициентами и найти комплексное число $g_0 = \Delta_c(j\omega_0)$; по формулам $\alpha_0 = \operatorname{Re} f_0 g_0$, $\alpha_1 = \operatorname{Im} f_0 g_0 / \omega_0$ найти коэффициенты числителя и сформировать передаточную функцию $F_0(s) = (\alpha_1 s + \alpha_0)/(s^2 + \beta_1 s + \beta_0)$ динамического корректора.

Замечание. Структура регулятора (28) позволяет обеспечивать астатизм замкнутой системы по переменной y с сохранением оптимальности по отношению к задаче (16). Действительно, легко показать, что здесь астатизм гарантируется выполнением равенства $F_0(0) = N_c(0)/\Delta_c(0) = 1/T_{22}(0)$, т. е. $N_c(0) = \alpha_0 = \Delta_c(0)/T_{22}(0)$.

Для того, чтобы обеспечить и дополнительное выполнение равенства (34), следует увеличить степень числителя передаточной функции корректора, принимая её в виде

$$F_0(s) = N_c(s)/\Delta_c(s),$$

$$\text{где } N_c(s) = \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0.$$

Соответственно изменяются формулы для поиска коэффициентов числителя:

$$-\alpha_2 \omega_0^2 + \alpha_1 \omega_0 j + \alpha_0 = f_0 g_0,$$

$$-\alpha_2 \omega_0^2 + \alpha_0 = \operatorname{Re} f_0 g_0, \quad \alpha_1 \omega_0 = \operatorname{Im} f_0 g_0,$$

откуда следует $\alpha_1 = \operatorname{Im} f_0 g_0 / \omega_0$, $\alpha_2 = -(\operatorname{Re} f_0 g_0 - \alpha_0) / \omega_0^2$.

Пример синтеза. Пусть заданы простейшие уравнения динамики устойчивого вращающегося объекта

$$\dot{\omega} = a_1 \omega + a_2 \psi + b_1 \delta + h_1 d(t),$$

$$\dot{\psi} = \omega, \quad \dot{\delta} = u, \quad y = \psi,$$

где ω — угловая скорость; ψ — угол поворота объекта; δ — отклонение исполнительных органов; u — управ-

ляющий сигнал; $a_1 = -0,125$; $a_2 = -0,00463$; $b_1 = -0,00220$; $h_1 = 0,100$; $d(t) = d_h(t) = A_h \sin \omega_0 t$ – гармоническое возмущение; $A_h = 1$; $\omega_0 = 0,3 \text{ с}^{-1}$.

Поставим вопрос о подавлении колебаний выходной переменной y с помощью обратной связи $u = W(p)y$ при наличии ограничения $|u(t)| \leq 13^\circ$ на управление.

Для формализации задачи введём в рассмотрение среднеквадратичный функционал

$$I = I(W) = \langle y^2 \rangle + k^2 \langle u^2 \rangle = \\ = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [y^2(t) + k^2 u^2(t)] dt,$$

$$k = 0,01,$$

который будем минимизировать выбором регуляторов специализированной структуры (28).

В соответствии с приведённым выше алгоритмом для данного объекта имеем

$$A_x = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & b_1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad c = (0 \quad 1 \quad 0);$$

$$A(s) = s^3 + 0,125s^2 + 0,00464s;$$

$$B(s) = -0,00220; \quad p = -316 - 719j.$$

Исходя из требований к динамике соответствующих движений, зададим векторы

$$k_z = (10,0 \quad 1,00 \quad -0,200);$$

$$g = (0,342 \quad 1,08 \quad -29,3)'$$

в уравнениях (31) и сформируем матрицу $T_z(s)$ объекта (31), разбивая её на скалярные блоки:

$$T_{11}(s) = (10,4s^2 + 1,81s + 0,0916) / \gamma(s);$$

$$T_{12}(s) = (s^3 + 1,21s^2 + 0,482s + 0,0644) / \gamma(s);$$

$$T_{21}(s) = (s^3 + 0,325s^2 + 0,0517s + 0,00313) / \gamma(s);$$

$$T_{22}(s) = 0,00220 / \gamma(s);$$

$$\gamma(s) = s^3 + 1,40s^2 + 0,744s + 0,187.$$

Поскольку условия (33) выполняются, вычислим по формуле (32) комплексное число $F(j\omega_0) = f_0 = 27,1 + 88,5j$. Далее задаём устойчивый квадратный трёхчлен $\Delta_c(s) = s^2 + 1,10s + 0,300$ и находим комплексное число $g_0 = \Delta_c(j\omega_0) = 0,210 + 0,330j$.

Для обеспечения астатизма имеем $\alpha_0 = 25,5$ и в соответствии с приведённым выше замечанием находим остальные коэффициенты полинома $N_c(s)$: $\alpha_1 = 91,8$, $\alpha_2 = 544$.

В итоге получена передаточная функция оптимального корректора

$$F_0(s) = \frac{N_c(s)}{\Delta_c(s)} = \frac{544s^2 + 91,8s + 25,5}{s^2 + 1,10s + 0,300},$$

нормальная реализация которой даёт искомый оптимальный регулятор со структурой (28):

$$\dot{z}_1 = -0,125z_1 - 0,347z_2 - 0,0022z_3 + 0,342y;$$

$$\dot{z}_2 = z_1 - 1,08z_2 + 1,08y;$$

$$\dot{z}_3 = 10,0z_1 - 513z_2 - 0,2z_3 - 15,8p_1 - 4,30p_2 + 515y;$$

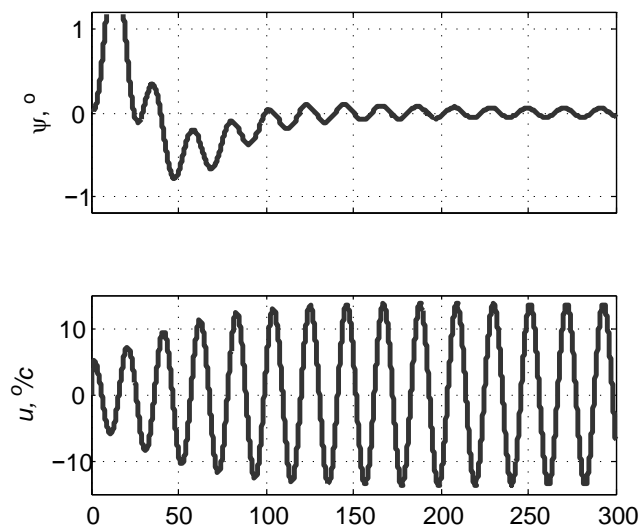
$$\dot{p}_1 = -32,0z_2 - 1,10p_1 - 0,300p_2 + 32y, \quad \dot{p}_2 = p_1;$$

$$u = 10,0z_1 - 543z_2 - 0,200z_3 - 15,8p_1 - 4,30p_2 + 544y.$$

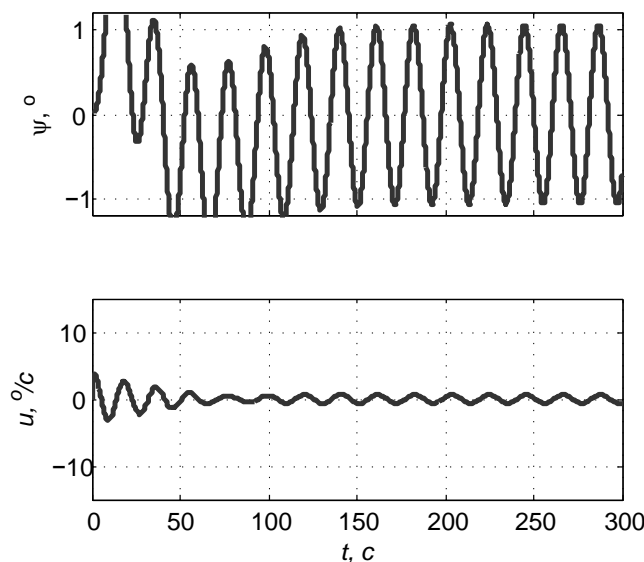
Качество функционирования полученного регулятора иллюстрируется рис. 1, а, где представлены процессы по выходу и управлению в замкнутой системе. Для сравнения на рис. 1, б показаны аналогичные процессы для менее мощного регулятора, синтезированного при $k = 0,2$, который не использует возможности, определяемые ограничением.

На рис. 2 представлены процессы для системы, замкнутой регулятором (28) с отключённым корректором. Из сравнения видно, что возможности управления используются здесь неоптимально.

Заключение. Рассмотрены вопросы, связанные с решением задачи о максимальном подавлении гармонических колебаний заданной частоты на выходе замкнутой системы с одним входом и одним выходом. Показано, что эта задача может быть трактована как частный случай теории среднеквадратичной оптимизации и решена средствами этой теории. Однако из-за неединственности решения, имеющей место в данном случае, существуют и другие варианты обратных



а)



б)

Рис. 1. Процессы в замкнутой системе для $k = 0,01$ (а) и $k = 0,2$ (б)

связей, обеспечивающие оптимальную меру подавления гармонического возмущения. Предложен простой алгоритм решения задачи на множестве обратных связей специальной структуры, позволяющей обеспечить комплекс желаемых динамических свойств замкнутой системы. Применение предложенного алгоритма проиллюстрировано содержательным примером синтеза управления устойчивым вращающимся объектом.

Результаты исследований, представленные в работе, могут быть применены при создании со-

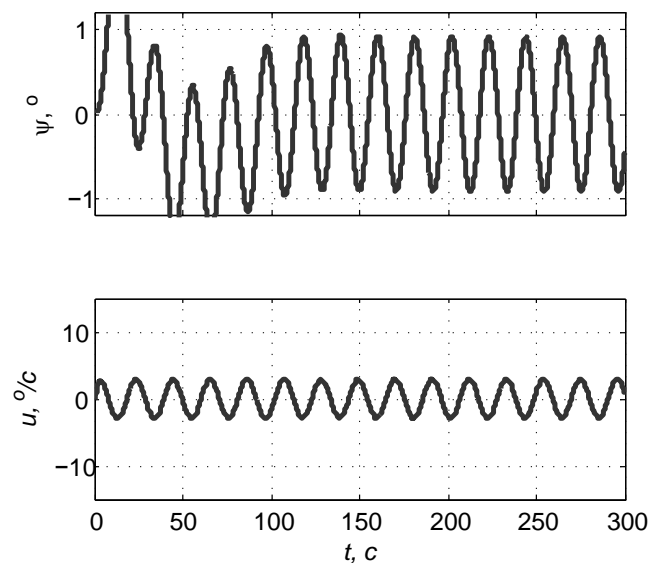


Рис. 2. Процесс в замкнутой системе для регулятора без корректора

временных систем автоматизации в промышленности, для решения задач обработки сигналов и управления в вопросах электро- и радиотехники, динамики морских подвижных объектов, проблем акустики, динамики виброустановок и в других сферах.

Библиографические ссылки

1. **Веремей Е.И.** Частотный метод синтеза оптимальных регуляторов для линейных систем со скалярным возмущением (1, 2) // Известия вузов СССР. Электромеханика. 1985. № 10. С. 52–57; № 12. С. 33–39.
2. **Веремей Е.И.** Спектральный подход к оптимизации систем управления по нормам пространств H_2 и H_∞ // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10. 2004. Вып. 1. С. 48–59.
3. **Веремей Е.И., Гайдук В.А.** Автоматизированный анализ возмущений с использованием полиномов Лагерра // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 3. С. 6–11.
4. **Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов.** Е.И. Веремей, В.М. Корчанов, М.В. Коровкин, С.В. Погожев СПб.: СПбГУ, 2002. 370 с.
5. **Петров Ю.П.** Оптимизация управляемых систем, испытывающих воздействие ветра и морского волнения. Л.: Судостроение, 1978, 320 с.
6. **Барабанов А.Е., Первозванский А.А.** Оптимизация по равномерно-частотным показателям (H-теория) // Автоматика и телемеханика. 1992. № 9. С. 3–32.
7. **Веремей Е.И., Петров Ю.П.** Метод синтеза оптимальных регуляторов, допускающий техническую реализацию // Математические методы исследования управляемых механических систем. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. С. 24–31.



ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

CISCO ОБЯЗУЕТСЯ ПОДДЕРЖАТЬ УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РОССИЙСКОЙ ПРОГРАММЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ РАССЧИТАННЫМИ НА НЕСКОЛЬКО ЛЕТ ИНВЕСТИЦИЯМИ В РАЗМЕРЕ ОДНОГО МЛРД. ДОЛЛАРОВ

Главный исполнительный директор Cisco Джон Чемберс подписал с Виктором Вексельбергом меморандум о взаимопонимании, предусматривающий физическое присутствие компании в Сколково. Чемберс также объявил о проведении в России конкурса I-Prize и об увеличении объема венчурных инвестиций в этой стране на 100 млн. долларов США.

23 июня 2010 г. в ходе состоявшихся в Сан-Хосе двусторонних переговоров Президент Российской Федерации Дмитрий Медведев и председатель совета директоров, главный исполнительный директор компании Cisco Джон Чемберс (John Chambers) обсудили широкий круг инициатив по совместной работе в поддержку российской программы технологических инноваций. На этой встрече Cisco взяла на себя твердое обязательство в качестве партнера по достижению поставленных Россией целей инвестировать один млрд. долларов США в развитие предпринимательства и устойчивых инноваций в этой стране. Cisco декларировала пять аспектов рассчитанной на десять лет программы совместной работы, в рамках которой и будут произведены инвестиции в размере одного млрд. долларов. Работа по всем этим пяти направлениям будет вестись параллельно.

Кроме того, на состоявшейся 23 июня встрече Джон Чемберс и глава фонда «Сколково» Виктор Вексельберг подписали меморандум о взаимопонимании, что подчеркнуло твердую приверженность компании Cisco проекту «Сколково» как платформе для реализации этой инновационной инициативы.

Первый аспект вышеупомянутой программы предусматривает целенаправленные усилия по привлечению талантов, идей и инвестиций в партнерстве с венчурным сообществом. В связи с этим Cisco объявила о том, что дополнительно выделит на венчурные инвестиции в российскую инновационную экономику 100 млн. долларов. За счет прямых инвестиций, поощряющих инновации, и углубления совместной работы с венчурным фондом Almaz Capital Partners компания Cisco намерена еще больше стимулировать деятельность венчурного сообщества, способствующую осуществлению российской инновационной программы.

В рамках второго направления своей деятельности по созданию в России инновационной и венчурной платформы Cisco объявила о твердом намерении обеспечить свое физическое присутствие в Инновационном центре Сколково. Подписанный

23 июня меморандум о взаимопонимании создаст основу для будущего сотрудничества Cisco с российскими правительством и бизнесом. Чтобы наполнить взятые на себя обязательства конкретным содержанием, Cisco незамедлительно начнет выделять ресурсы в области развития бизнеса, передовых идей, услуг и консалтинга. Cisco намерена сделать Сколково первым в России населенным пунктом, где будет применена ее новейшая концепция «умных» и подключенных к Интернету сообществ, а также создать модель совместной работы в поддержку дальнейшего устойчивого социально-экономического и экологического развития России.

Третье направление деятельности Cisco предусматривает расширение объема ресурсов, выделяемых для научных исследований и конструкторских разработок в России. Предполагается, что по завершении строительства инфраструктуры в Сколково старший вице-президент компании Cisco Мартин де Бир (Marthin De Beer) сформирует вторую глобальную штаб-квартиру для отдела перспективных технологий Cisco (Emerging Technologies Group) и разместит в Сколково ведущих специалистов своей инженерной команды. Cisco намерена использовать инновационную платформу Сколково для создания ряда новых бизнес-подразделений и будет способствовать превращению Сколково в одну из наиболее технологически развитых зон в мире. Cisco уже задействовала производственные и научно-исследовательские ресурсы, специально выделенные для разработки технологий маршрутизации для России, и позаботится о том, чтобы распространить свой инженерный опыт на весь этот регион.

Еще одно направление деятельности Cisco будет нацелено на совместную разработку моделей выхода на рынок, обеспечивающих успешную деятельность предприятий-стартапов в партнерстве с российским венчурным сообществом. Чтобы с самого начала содействовать развитию новаторского духа, Cisco объявила третий этап своего конкурса I-Prize, специально организуемый для команд российских предпринимателей, которым будет предложено разработать инновационные идеи и принять участие в создании компаний-стартапов, способных открыть для Cisco новые рынки объемом не менее одного млрд. долларов. Для победителей конкурса Cisco выделит призовой фонд в 175 тыс. долларов США (эта сумма входит в объявленный сегодня общий объем инвестиций). Кроме того, используя свое присутствие в Сколково, Cisco будет готова поддержать и коммерциализировать концепцию победителя российского конкурса I-Prize.

Пятый аспект программы Cisco предусматривает разработку модели партнерства с существующими российскими предприятиями, венчурными и техно-

логическими компаниями. Разработав модель совместной работы, наглядно демонстрирующую, как наладить успешное партнерство с ведущими российскими коллективами, Cisco позаботится о том, чтобы осуществить совместные проекты в таких областях, как smart grid («умные» сети электропередач), финансовые услуги, операторские модели, финансирование, развертывание широкополосных и социальных сетей для создания продуктов, решений и бизнес-моделей, пригодных для экспорта. Кроме того, Cisco планирует со временем повысить ценность своих физических активов в Сколково за счет применения технологий совместной работы и расширить свое виртуальное присутствие в интересах развития инноваций в России и за рубежом. Ожидается, что это поможет растиражировать по всему миру ряд инновационных центров «умных» и подключенных к Интернету сообществ поначалу в виде физических, а затем — виртуальных объектов.

Инновационный центр Сколково. Планы развития Сколково, объявленные Президентом РФ Д. Медведевым в марте 2010 года, направлены на создание в России центра технологического и инновационного развития. Инновационный центр Сколково, построенный на основе обозначенных Президентом Медведевым приоритетов по экономическому развитию и модернизации страны, будет сосредоточен на информационно-коммуникационных технологиях, а также на биотехнологиях, энергетике и ядерных исследованиях. Управление проектом и его финансирование будет осуществлять консорциум, состоящий из государственных и частных организаций России. «В течение ближайшего десятилетия — заявил Дмитрий Медведев — Россия должна стать страной, где благополучие и высокое качество жизни граждан обеспечивается не столько за счёт сырьевых источников, сколько интеллектуальными ресурсами и инновационной экономикой. Проект «Сколково» воплощает в себе то внимание, которое мы уделяем инновациям и государственно-частному партнерству. Мы приветствуем обязательства, которые Cisco берет на себя вместе с нами в поддержку будущего России».

По условиям меморандума о взаимопонимании, Cisco поделится с фондом «Сколково» своим глобальным передовым опытом и знаниями в области создания инновационных центров и применит этот опыт для развития Инновационного центра Сколково. Особое внимание при этом будет уделено формированию культуры инноваций и совместной работы и созданию тиражируемых бизнес-моделей. Предусматривается, что Cisco получит возможность играть ведущую роль в проектировании Инновационного центра Сколково. При этом за основу будет взята бизнес-модель, использованная при строительстве Восточного центра глобализации Cisco в Бангалоре (Индия).

Инновационный центр Сколково будет спроектирован таким образом, чтобы полностью соответствовать концепции Cisco по созданию «умных» и подключенных сообществ (Smart+Connected Communi-

ties). Он станет образцовым объектом в развитии ряда приоритетных областей, включая «умные» подключенные здания (Smart Connected Buildings), «умные» сети электропередач (Smart Grid), «умную» подключенную недвижимость (Smart Connected Real Estate), физическую и информационную безопасность, подключенный к Интернету транспорт, образование и здравоохранение.

Cisco и фонд «Сколково» будут осуществлять и другие программы развития навыков и умений в области информационно-коммуникационных технологий и предпринимательства, разработанные на базе существующих учебных программ и инициатив Cisco, таких как программа Института предпринимательства Cisco. Эта инициатива, уже успешно действующая в таких странах, как США, Турция и Мексика, предлагает практичный учебный курс, позволяющий предпринимателям и владельцам малого бизнеса полностью развить свой потенциал. «Точка зрения президента Медведева о трансформации экономического развития путем инноваций — считает председатель совета директоров, главный исполнительный директор компании Cisco Джон Чемберс — хорошо сочетается с нашей собственной убежденностью в том, что новаторское использование технологий может положительно повлиять на конкурентоспособность страны и диверсификацию ее индустриальной базы, на ее способность к созданию новых рабочих мест и повышению качества жизни граждан. Cisco активно привлекает талантливых специалистов и вкладывает средства в инновации, чтобы воспользоваться возможностями, открывающимися в связи с рыночными переменами. Наш подход состоит в создании рабочих мест и инвестициях на базе роста и развития нашего бизнеса, как в США, так и во всем мире, где, как мы видим, многие страны вкладывают средства в образование, инфраструктуры и инновации. Россия делает то же самое, что открывает для Cisco возможность расширения нашего бизнеса и развития нашей инновационной платформы».

Российский конкурс Cisco I-Prize. Проводимый третий год подряд конкурс Cisco I-Prize представляет собой всемирное соревнование в области инноваций, стимулирующее разработку новых бизнес-моделей и возможностей в интересах компании Cisco. Победителем первого конкурса I-Prize (был проведен в 2008 г.) стал международный российско-германский коллектив, чьи идеи внесли существенный вклад в разработку стратегии Cisco в сфере подключенной энергетики.

На проведение российского конкурса I-Prize компания Cisco выделит призовой фонд в размере 175 тыс. долларов. Победитель конкурса получит 100 тыс. долларов США, команда, занявшая второе место, — 50 тыс. долларов, а третье место — 25 тыс. долларов. В случае успеха этой инициативы Cisco рассмотрит возможность организации в России дополнительных конкурсов I-Prize в целях дальнейшего стимулирования инноваций.

Российский конкурс I-Prize призван привлечь талантливых новаторов и новые идеи, способные стать

основой предприятий-стартапов, которые могли бы разместиться в Инновационном центре Сколково. Кроме того, признанная лучшей идея и команда, ее разработавшая, могут стать кандидатами для инвестиций со стороны Cisco и/или фондов венчурного капитала.

Долгосрочная приверженность Cisco инновациям и обучению специалистов. К настоящему времени Cisco сделала прямые и косвенные венчурные инвестиции в ряде стран, в том числе в США, Китае, Индии, Израиле, Южной Корее, Мексике и Европе, включая Россию.

Cisco расширяет и ускоряет свои инвестиции на рынках, где компания уже присутствует, а также выходит на новые рынки с новыми коллективами и партнерами в рамках своей общей стратегии глобальных рыночных инвестиций.

В 2008 г. Cisco объявила о якорных инвестициях в размере 30 млн. долларов в венчурный фонд Almaz Capital Russia Fund I, L.P. («Алмаз-Капитал/Cisco Фонд 1») в качестве первоначальных вложений на общую сумму 60 млн. долларов, предназначенных для России и других стран СНГ и размещаемых совместно с компанией Almaz Capital Partners

В течение ряда лет Cisco активно участвовала в развитии технического образования в России. В настоящее время в России работают 133 Сетевые академии Cisco, которые предоставляют услуги обучения по всей территории стран. В соответствии с объявлением, сделанным 23 июня Джоном Чемберсом, число Сетевых академий Cisco в России возрастет до 300.

ОРГКОМИТЕТ «EXOPRIORITY'2010» НАЧАЛ РАБОТУ

В ЦВК «Экспоцентр» состоялось первое заседание Оргкомитета по подготовке и проведению второго международного форума по интеллектуальной собственности «Exopriority'2010», которое провел руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Б.П. Симонов.

Во вступительном слове перед участниками Оргкомитета Генеральный директор ЦВК «Экспоцентр» В.Л. Малькевич отметил, что площадка «Экспоцентра» становится привлекательной для патентоведов и российских изобретателей. «Сегодня, — сказал В.Л. Малькевич, характеризуя состав участников совещания, — собрались единомышленники по решению такого сложного, но чрезвычайно актуального для инновационного развития страны вопроса, как широкое внедрение нормы Парижской конвенции по охране промышленной собственности от 1883 г., касающейся временной охраны объектов промышленной собственности на выставках. Речь идет, прежде всего, об изобретениях, полезных моделях и промышленных образцах (и именно эти три объекта промышленной собственности наиболее значимо влияют на ускорение темпов научно-технического прогресса), а также о товарных знаках,

широко применяющихся в рекламных кампаниях производителей товаров и услуг».

Генеральный директор «Экспоцентра» отметил, что в успехе первого международного форума по интеллектуальной собственности «Exopriority-2009» огромную роль сыграла заинтересованная и высоко-профессиональная работа многих членов Оргкомитета, и особенно таких известных специалистов, как профессор Л.Е. Комаров, профессор И.А. Блинец, академик В.М. Бузник. Этот успех позволил, в частности, добиться официального признания форума со стороны Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС).

В.Л. Малькевич констатировал, что вопрос о гармонизации патентных систем государств — участников Парижской конвенции назрел давно. Требуется современная расшифровка понятия «официальные и официально признанные международные выставки», используемого в двух конвенциях — упоминавшейся Парижской конвенции и Конвенции о международных выставках от 1928 г. По итогам Форума 2009 г. эти вопросы уже начали прорабатываться на национальном и международном уровне. В частности, недавно руководитель «Экспоцентра» подписал обращение по данному вопросу в Международное бюро выставок, ответственное за подготовку и проведение Всемирных выставок «ЭКСПО».

Среди вопросов повестки дня второго международного форума по интеллектуальной собственности «Exopriority'2010» вполне может появиться пункт об инициировании разработки нового международно-правового акта вместо внесения поправок в существующие. Такой документ можно условно назвать «Международная конвенция о конгрессно-выставочной деятельности».

В.Л. Малькевич представил собравшимся нового Председателя Оргкомитета по подготовке Форума по интеллектуальной собственности 2010 г. — руководителя Роспатента Б.П. Симонова, а также заместителя Председателя Оргкомитета, вице-президента ТПП РФ В.П. Страшко.

Б.П. Симонов подчеркнул, что вопросы, которые детально исследует Форум, действительно давно назрели, и особую актуальность им придает курс на инновационный характер развития экономики страны. К тому же Россия намерена инициировать пересмотр или создание нового международно-правового документа. Это — особая почетная миссия данного Форума.

Об итогах первого международного форума по интеллектуальной собственности, который проходил в «Экспоцентре» с 8 по 10 декабря 2009 г., подробно рассказал в специальном сообщении заместитель Генерального директора «Экспоцентра» С.С. Беднов. Он привел статистику мероприятия, которую представила независимая аудиторская фирма. Так, «Exopriority'2009» посетило свыше 2 тыс. специалистов. В Форуме приняли участие 195 учреждений, фирм, организаций и индивидуальных изобретателей из 7 стран (Бельгия, Венгрия, Германия, Иордания, Украина, ЮАР, Россия).

Сопровождавшая Форум 2009 г. выставка инноваций носила вспомогательный характер. Тем не менее «Территория инноваций» — таково было название экспозиции — оказалась востребованной разработчиками новых товаров и технологий. Что касается патентоведов и специалистов по всем аспектам интеллектуальной собственности, то они также признали Форум в «Экспоцентре» в качестве площадки для своего профессионального общения.

На Форуме впервые в целях установления льготы по новизне для изобретений, полезных моделей и промышленных образцов или подтверждения выставочного приоритета товарного знака были разработаны и начали выдаваться на постоянной основе Свидетельства, подтверждающие демонстрацию экспоната и/или товарного знака на выставках, организуемых ЦВК «Экспоцентр».

По состоянию на 1 июня 2010 г. уже выданы или находятся в процессе выдачи 14 Свидетельств о демонстрации экспоната на выставке и 4 Свидетельства о демонстрации товарного знака на выставке.

Впервые в практике работы выставочных комплексов на Форуме «Exhpriority'2009» была создана Консультационная зона, где все желающие могли бесплатно получить консультации патентных поверенных и таможенных адвокатов по вопросам, связанным с интеллектуальной собственностью, причем как на русском, так и на английском языках.

Впервые на ЦВК «Экспоцентр» в рамках Форума по интеллектуальной собственности была развернута площадка для официальных мероприятий с поднятием корпоративных флагов главных участников.

Важным результатом первого международного форума по интеллектуальной собственности стало инициирование и проведение Инновационного конкурса российских производителей, который впервые работал на выставке «Металлообработка–2010».

С участниками заседания Оргкомитета своими впечатлениями о конкурсе и информацией о его результатах поделился председатель Жюри, президент Российской ассоциации владельцев товарных знаков Л.Е. Комаров. Он отметил, что конкурс отличался наличием предварительной экспертизы представленных решений на новизну. Это, по его мнению, позволило дать четкий сигнал инвестиционным фондам и финансовым институтам в отношении селекции новшеств, прошедших конкурсный отбор.

По незащищенным разработкам экспоненты получили Свидетельства о демонстрации экспонатов на выставке, позволяющие им (в случае необходимости) воспользоваться «льготой по новизне» и подать патентную заявку в национальное патентное ведомство (Роспатент) в течение 6 месяцев со дня официального открытия выставки — без ущерба для своих исключительных прав в Российской Федерации в связи с так называемым «ранним раскрытием».

Обладателями первого места стали ООО «Научно-промышленная корпорация «Дельта-Тест» (Московская область, г. Фрязино) и ОАО «Тяжпресмаш» (г. Рязань).

Участники первого заседания Оргкомитета второго международного форума по интеллектуальной собственности обсудили концепцию и проект программы «Exhpriority'2010», уделив при этом внимание соотношению нового проекта «Экспоцентра» с действующими аналогичными проектами. В частности, об итогах Всероссийского форума «Интеллектуальная собственность — XXI век», проводимого Торгово-промышленной палатой РФ (ТПП РФ), рассказал вице-президент ТПП РФ В.Б. Исаков. Вице-президент ТПП РФ В.П. Страшко предложил свое видение будущей специализации двух крупнейших конгрессных событий в области защиты интеллектуальной собственности — они не конкурируют, а взаимно дополняют друг друга, при этом важная роль отводится координации деятельности. Оживленная дискуссия показала, что интерес к Форуму проявляют представители сразу нескольких профессиональных сообществ. Руководитель Роспатента, председатель Оргкомитета Б.П. Симонов подчеркнул, что в программе Форума желательно наличие всего спектра тематик, связанных с патентованием изобретений, привлечением инвестиций в их производство, а также последующим правовым сопровождением в ходе формирования брэнда. Он отметил необходимость четкого позиционирования Форума, определения оптимальной целевой аудитории. «Нет сомнений в том, что Форум должен стать международным по сути и по форме, причем центральными вопросами должны стать правовая охрана и повышение инвестиционной привлекательности инноваций, управление патентной стратегией», — сказал Б.П. Симонов, завершая обсуждение концепции Форума «Exhpriority'2010».

Оргкомитет заслушал также сообщение о растущем профессиональном интересе к Форуму. За прошедшие три месяца на сайте Форума побывало более 15 тыс. уникальных посетителей, что свидетельствует о большой востребованности мероприятия среди специалистов, занимающихся теми или иными вопросами защиты интеллектуальной собственности.

Значительный интерес к Форуму проявили профильные министерства и ведомства, отвечающие за инновационную политику, представители которых участвовали в заседании, представители бизнеса и инвестиционных структур. О широкой поддержке второго международного форума по интеллектуальной собственности со стороны РАН заявили академик В.М. Бузник и доктор экономических наук, профессор, руководитель Центра экономических программ В.Г. Кисмерешкин — оба члены президиума Оргкомитета и активные сторонники нового проекта «Экспоцентра».

По итогам заседания Оргкомитета «Exhpriority'2010» его участники приняли ряд решений.

Форум по интеллектуальной собственности «Exhpriority'2010», соорганизаторами которого выступают ТПП РФ и ЦВК «Экспоцентр», будет проводиться под патронатом Роспатента и при поддержке Всемирной организации интеллектуальной

собственности (ВОИС) с 7 по 9 декабря 2010 г. в ЦВК «Экспоцентр».

Для обеспечения преемственности Всероссийского форума «Интеллектуальная собственность – XXI век», ежегодно проводимого ТПП РФ, и Форума по интеллектуальной собственности «Expriority'2010», проводимого на площадке ЦВК «Экспоцентр», признано целесообразным учредить в рамках Форума «Интеллектуальная собственность – XXI век» специальную секцию по вопросам выставочного приоритета и разработки предложений по внесению изменений в законодательство в этой части.

При председателе Оргкомитета будет создана постоянная рабочая группа из числа представителей Роспатента, ТПП РФ, Министерства образования и науки России, «Экспоцентра» для оперативного решения вопросов организации и проведения Форума.

ЦВК «Экспоцентр» представит окончательный проект программы Конгресса по интеллектуальной собственности и деловую программу Форума по интеллектуальной собственности «Expriority'2010» для официальной регистрации в ВОИС.

Оргкомитет обратился также к Российской академии наук, Всероссийскому обществу рационализаторов и изобретателей, Группе компаний «Verysell» (Инноград «Сколково») и коллективным организаторам с просьбой оказать содействие по привлечению к участию в выставке инноваций технопарков, бизнес-инкубаторов, индивидуальных изобретателей, а также малых инновационных предприятий, создаваемых при бюджетных научных и образовательных учреждениях в соответствии с Федеральным законом №217-ФЗ от 02.08.2009 г.

К Форуму помимо российских участников будут привлечены предприятия и индивидуальные изобретатели по линии торговых палат стран СНГ, а также региональных торгово-промышленных палат Российской Федерации.

НА AUTODESK ФОРУМЕ РАССКАЗАЛИ, КАК НАДО ПРОЕКТИРОВАТЬ

Ведущие инновационные компании представили свои технологии и научили с ними обращаться.

22 и 23 сентября 2010 г. в Москве прошел 4-й Autodesk Форум, который посетили более 1200 участников из разных регионов России и стран СНГ. На крупнейшем ежегодном мероприятии в сфере систем автоматизированного проектирования в России и СНГ ведущие специалисты в области машиностроения, архитектуры и строительства, а также создания виртуальной реальности рассказали о том, как визуализация помогает продавать проектные решения, какой экономический эффект дает внедрение САПР, и как экологически рациональное проектирования влияет не только на окружающую среду, но и на эффективность бизнеса.

На Форуме представители российских и зарубежных компаний на примере конкретных проектов продемонстрировали приемы работы и технологии,

позволяющие повысить эффективность процессов проектирования, производства и строительства новых изделий, зданий, объектов инфраструктуры. «Инновационное проектирование – это важное конкурентное преимущество вашего бизнеса. Не стойте на месте, действуйте!», – сказал в своем выступлении Рудольф Данзер, вице-президент Autodesk, руководитель представительства Autodesk в СНГ.

Участники мероприятия узнали, какие инструменты и технологии применялись при проектировании самых разных объектов: от Большого адронного коллайдера, спортивных объектов в Сочи, вагонов, мебели, автомобильных развязок и элементов грузоподъемных машин до водного элемента в компьютерной онлайн-игре.

«Одна из важнейших задач компании, разрабатывающей новые технологии – повышать уровень информированности специалистов отрасли, – говорит директор по маркетингу Autodesk в России и СНГ Анастасия Морозова. – Именно поэтому мы каждый год вкладываем очень большие силы в организацию и проведение Форума, посвященного технологиям проектирования. В этом году мы еще больше насытили программу, расширили ее до двух дней, чтобы вместить максимум полезной информации, посвященной как практическим аспектам эффективного решения повседневных задач, так и тому, каким образом эксперты рынка видят будущее развитие технологий САПР».

На Выставке Технологий, впервые действовавшей в рамках Форума, были продемонстрированы самые интересные и «вкусные» инновационные технологии: полноцветный 3D-принтер, роботы, разработанные молодыми и талантливыми инженерами из Зеленограда, система дополненной реальности, интерактивные дисплеи и планшеты, а также новейшие видеокарты и устройства широкоформатной печати.

Автоматизация отдельных рабочих мест инженеров и проектировщиков не позволяет добиться желаемого повышения эффективности бизнеса предприятия. Требуется мощный шаг вперед, и он возможен при построении эффективных процессов проектирования и внедрении комплексных решений. Ключевую мысль Форума озвучили «Разрушители мифов об AutoCAD» Дмитрий Тищенко и Алексей Кулик: «Серебряной пули не существует – программные продукты, сколь совершенны бы они ни были, требуют правильного внедрения, обучения и использования». Поддерживая эту идею, компания Autodesk стремится помогать пользователям осваивать новые технологии, выстраивать процесс взаимодействия между всеми участниками процесса проектирования. Autodesk Форум продолжится серией из более 400 тест-драйвов новых программных продуктов в 40 городах СНГ. В основе каждого тест-драйва, представляющего из себя пошаговые инструкции по решению конкретных и актуальных задач проектирования, лежат реальные проекты российских, украинских и казахстанских компаний.

**ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ**

УДК 621.002.51

По страницам журналов

Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2010. № 3.

Предложена методика расчётного определения функций плотности пористых и композитных материалов и зависимости напряжения текучести от текущей плотности для использования их в континуальной феноменологической модели. Приведённые данные о результатах моделирования позволяют надеяться, что результаты моделирования могут быть с приемлемой точностью использованы для исключения экспериментальных исследований механических свойств пористых материалов.

Преобразование растровых изображений при разработке управляющих программ для лазерного технологического комплекса. *Вестник компьютерных и информационных технологий.* 2010. № 3.

Рассмотрена проблема преобразования растровых изображений в задачах подготовки управляющих программ для промышленного лазера Legend 32. Предложены принципы формирования изображений при лазерной гравировке в различных режимах и алгоритм преобразования растрового изображения для формирования управляющих программ. Представлены структура системы, работающей по данному алгоритму, и реализация этой структуры в специализированном приложении.

Разработка и интерпретация решения расчётных задач в среде Web-обучения. *Информационные технологии.* 2010. № 4.

Рассмотрены вопросы создания комплекса методов и средств разработки и интерпретации решения расчётных задач в среде Web-обучения. Обоснованы модель представления задачи в виде раскрашенной сети Петри, а также выбор стандартов сетевой реализации комплекса, обеспечивающий возможность его повторного использования в любой операционной и программной среде. Приведён пример описания и интерпретации процесса решения расчётной задачи в предметной области электромеханики.

Структурно-аналитическая модель формирования состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки. *Автомобильная промышленность.* 2010. № 4.

Разработана структурно-аналитическая модель формирования состояния поверхностного слоя

на стадиях механической обработки. Показана главная роль программы нагружения в формировании и трансформации свойств поверхностного слоя.

Интеллектуальные системы электроснабжения автотранспортных средств. *Грузовик.* 2010. № 4.

Рассмотрены интеллектуальные системы электроснабжения автотранспортных средств, использующие оптимальные алгоритмы работы, обеспечивающие снижение токсичности отработавших газов двигателя и расхода топлива двигателем на привод генераторной установки, стабильность напряжения в бортовой сети и заданное зарядное состояние аккумуляторной батареи. Приведена классификация интеллектуальных адаптивных систем электроснабжения в зависимости от задач, решаемых ими.

Несущая способность рабочего колеса реактивной турбины в неравномерном температурном поле. *Полёт.* 2010. № 4.

Статья посвящена разработке методик для определения несущей способности рабочих колёс реактивных турбин во всём диапазоне нагрузок от центробежной силы, перепада давлений и температурного воздействия. Для построения предельной поверхности использовался метод конечных элементов, реализованный в программном пакете MSC.Nastran, с нелинейной моделью материала и с учётом зависимости свойств материала от температуры. Анализ построенной поверхности позволяет точнее оценивать запас прочности турбины и выбирать пути её форсирования.

Численное моделирование микроэлектронного сенсора теплового потока. *Нано- и микросистемная техника.* 2010. № 4.

Представлены упрощённая тепловая и конечно-элементная модели микроэлектронного сенсора теплового потока, обсуждены особенности конструкции. Определено тепловое сопротивление и получены выражения для выходного сигнала сенсора. Показано, что численное моделирование точнее описывает характеристики по сравнению с аналитической моделью. Проведено сравнение модельных расчётов с экспериментальными данными, которое подтвердило правильность моделей. Предложенная численная модель позволяет проводить оптимизацию характеристик сенсора.