

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Калужский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ

**Материалы
Региональной научно-технической конференции**

Том 1



УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
НЗ4

Руководитель конференции:

С.А. Кусачева (председатель совета по НИР студентов и аспирантов)

Руководители направлений:

А.И. Пономарев (ф-т КМК), *Ю.С. Белов* (ф-т ФНК), *М.Ю. Адкин* (ф-т ЭИУК),
А.Г. Вяткин (ф-т МТК), *О.А. Артеменко* (ф-т СЭК)

Руководители секций:

Е.Н. Мальшев, Г.В. Орлик, В.В. Андреев, А.А. Жинов, Ю.П. Корнюшин,
Н.Е. Шубин, А.И. Пономарев, А.К. Рамазанов, А.А. Анкудинов, Б.М. Логинов,
В.Г. Косушкин, А.В. Мазин, А.А. Шубин, А.К. Горбунов, А.В. Максимов,
В.Н. Пащенко, М.В. Астахов, Е.Н. Сломинская, О.Л. Перерва, Г.И. Ловецкий,
А.Ю. Красноглазов, В.М. Алакин

НЗ4 **Научоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе:** материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2017 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 301 с.

В сборнике материалов Региональной научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкции и материалы.

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2017
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2017

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.В. Барков

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ ТИПА ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время станки типа обрабатывающий центр получили широкое распространение в серийном производстве, позволяя с высокой производительностью обрабатывать изделия широкой номенклатуры при относительно небольших затратах на переналадку. Инструмент может описывать сложную траекторию, необходимую для обработки пространственных поверхностей.

Станки данного типа позволяют значительно сократить время обработки деталей в условиях серийного и мелкосерийного производств за счет сокращения вспомогательного времени, затрачиваемого на смену инструмента, установку и закрепления заготовок. Только за счет сокращения вспомогательного времени производительность может увеличиться в 1,5 раза по сравнению с обработкой на универсальных металлорежущих станках.

Несмотря на широкие технологические возможности станков данного типа в технической литературе мало внимания уделено анализу точностных характеристик этого оборудования.

Отсюда вытекает необходимость разработки способов анализа и количественной оценки точности обработки на станках данного типа в зависимости от условий обработки.

Одной из основных погрешностей механической обработки является погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы. По данным работы [6], доля погрешности, вызванной деформациями технологической системы, может достигать от 20% до 70% от общей погрешности обработки.

В общем случае величина упругих отжатию ТС может быть рассчитана по формуле [5, стр. 112]:

$$y = \frac{P_y}{j} \quad (1)$$

где P_y – величина силы резания, J – жесткость технологической системы.

Таким образом, для расчета упругих отжатию ТС необходимо знать значение сил резания и жесткости системы.

Часто с целью упрощения расчетов вводится понятие податливости технологической системы. Под податливостью ТС понимают величину, обратную жесткости [1, стр. 91]:

$$\omega = \frac{1}{J} \quad (2)$$

где J – жесткость технологической системы.

Жесткость технологической системы также может быть рассчитана по математическим зависимостям. Но такой расчет очень трудоемок. Поэтому

более рациональным способом определения жесткости технологической системы является экспериментальные способы, описанные в работе [3].

Одним из таких методов является метод Корсакова В.С., основанный на определении разности заданной и фактической глубин резания. Корсаков вводит понятия остаточной глубины резания ($t_{ост.}$) – слоя металла, который не был удален с заготовки из-за действия деформаций, и равный по величине самой деформации. При измерении фактической глубины резания следует учитывать, что шероховатость выглаженной и обработанной поверхностей отличается. Разница шероховатостей оказывает влияние на точность измерения $t_{факт.}$. Поэтому для точного определения фактической глубины резания необходимо использовать формулу:

$$t_{факт.} = A + (R_{ZB} - R_{ZA}) \quad (3)$$

где A – величина, полученная при измерении, R_{ZB} и R_{ZA} – шероховатость обработанной и «выхоженной» поверхности соответственно.

Недостаток данного метода в том, что величина деформаций здесь напрямую зависит от величины компонента силы резания P_y , поэтому данный метод применим лишь для небольших глубин резания и небольших значений главного угла в плане, когда преобладает именно составляющая P_y . В противном случае необходимо использовать другие методы определения жесткости.

Учитывает влияние других компонентов сил резания метод, предложенный Соколовским А.П. Данный метод основан на том, что при обработке заготовок с неодинаковым припуском погрешность заготовки (ступенчатость, биение, несоосность и т.д.) остается на обработанной детали, но при этом величина погрешности становится меньше. При этом чем выше жесткость технологической системы, тем меньше величина погрешности на обработанной детали.

Степень копирования погрешностей можно оценить по формуле [4, стр.55]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{заг.}}{\Delta_{дет.}} \quad (4)$$

где $\Delta_{заг.}$ – погрешность заготовки, $\Delta_{дет.}$ – погрешность детали.

Поскольку при проведении испытаний геометрия режущей части, материал и режимы резания не меняются, то можно сказать, что степень копирования характеризует жесткость технологической системы, которую можно определить как [4, стр. 55]:

$$J = \lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75} \cdot \varepsilon \quad (5)$$

где ε – степень копирования погрешностей, s – подача, C_p – коэффициент, характеризующий условия обработки, λ – соотношение между компонентами силы резания.

При обработке усилия резания могут распределяться таким образом, что отжим инструмента будет происходить не от, а на заготовку. Для таких случаев Соколовский вводит понятие отрицательной жесткости.

При больших глубинах резания на величину и направление упругих деформаций влияют в разной степени все компоненты силы резания, поэтому формула (1) не применима. Более точным является соотношение:

$$y = \frac{P_z}{J} \quad (6)$$

где P_z - эквивалентная сила отжима, вычисляемая по формуле:

$$P_z = \xi \cdot P_z + \eta \cdot P_y + \gamma \cdot P_x \quad (7)$$

Еще один метод определения жесткости разработан Кораблевым П.А.

Суть данного метода состоит в том, что образец обрабатывается с прямой и обратной подачами. При этом технологическая система деформируется под действием сил резания. После обработки всей поверхности детали технологическая система возвращается в настроенное положение и при обратной подаче снимается стружка, толщина которой зависит от режимов обработки и жесткости системы.

При этом величина разности размеров поверхностей, обработанных только с прямой и с прямой и обратной подачами, и является величиной упругой деформации технологической системы, по которой судят о жесткости ТС:

$$y = \frac{D_n - D_{n.o.}}{2} \quad (8)$$

где D_n и $D_{n.o.}$ – диаметры поверхностей, обработанных с прямой и прямой и обратной подачами соответственно.

Преимущество перечисленных выше методов в том, что они, не требуя сложного измерительного инструмента, оценить жесткость технологической системы в рабочих условиях. Основной недостаток – данные методы применимы в основном для станков токарной группы, и не пригодны для других методов обработки, например, фрезерования.

Список литературы

[1] Жуков Л.Э. Технология машиностроения. - Ч. 1: Учебное пособие. Санкт-Петербург. - Изд-во СПбГТУ. - 1999. - 295 с.

[2] Калмыков В.В., Барков А.В. Аналитическое и статистическое оценивание упругих деформаций при фрезеровании по контуру// Фундаментальные исследования. - 2016. - №8-1. - с.34-38.

[3] Мальцев В.Г., Моргунов А.П., Морозова Н.С. Графическая форма представления производственного способа А.П. Соколовского определения жесткости технологической системы// Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. - №2. - с. 319-322.

[4] Соколовский А.П. Жесткость в технологии машиностроения. - М.: Машиностроение. – 1946. - 206 с.

[5] Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение. – 2002. - 684 с.

[6] Шелихов Е.С. Повышение точности изготовления нежестких валов на станках с ЧПУ методом автоматической коррекции управляющей программы. Дис. канд. Техн. наук. – Оренбург. – 2016. - 182 с.

Барков Александр Викторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: cbzst@yandex.ru

Р.М. Юхимец, С.А. Бысов

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ДЕТАЛЯМ И ОБОРУДОВАНИЮ В РАМКАХ МЕТОДИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ОПЕРАЦИЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ И СБОРКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для современного машиностроения с учетом большого разнообразия оборудования и средств технического оснащения наиболее важным становится вопрос эффективного использования технологических возможностей этого оборудования. Традиционно возможности производства оцениваются объемом выпускаемой продукции определенной номенклатуры при установленном режиме работы [1]. Однако в современных условиях крайне важным фактором любого предприятия является его способность к быстрой перестройке на выпуск новой продукции. Широкое распространение станков, оснащенных числовым программным управлением позволяет значительно расширить номенклатуру выпускаемой продукции. Однако, эффективность использования широкоуниверсального оборудования на предприятии варьируется в пределах 10-30% [2]. Таким образом вопрос о поиске путей расширения технологических возможностей, а именно возможностей более эффективного использования имеющегося оборудования, крайне актуален в рамках тенденций развития современного машиностроения.

Одним из возможных путей расширенного использования металлообрабатывающего оборудования является применение его для операций, не связанных со снятием металла, в частности для осуществления процессов сборки [3]. В настоящее время практически отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования, в том числе и обобщение производственного опыта, которые послужили бы научной базой при проектировании технологических процессов изготовления изделий на основе концентрации обработки и сборки.

В рамках научного обоснования принятия решения об использовании концентрации были рассмотрены следующие вопросы:

- Требования к геометрии деталей, подлежащих обработке и сборке по методике концентрации операций
- Требования к формообразующей системе станка
- Требования к исполнительным механизмам металлообрабатывающего оборудования, на котором будет осуществляться непосредственно обработка и сборка деталей

С целью определения требований к геометрии сопрягаемых деталей были проанализированы два варианта ориентации охватывающей детали

после обработки (рис. 1), а также различные формы образующей поверхности охватываемой детали (рис. 2).

В результате проведенного анализа были выявлены следующие требования к сопрягаемым поверхностям деталей, подлежащих сборке:

- Функция образующей поверхности сопряжения на всем участке своего распределения не должна иметь локальных экстремумов или возрастающих и убывающих участков. В противном случае осуществление сопряжения невозможно
- После заключительного этапа механической обработки, предшествовавшего сборке базовая деталь должна быть сориентирована так, чтобы все элементы образующей кривой поверхности сопряжения описывались неубывающими функциями. Иначе деталь после обработки следует переустановить, что влечет за собой появление погрешности установки.
- Для осуществления сборки функция образующей охватываемой детали должна быть так же неубывающей

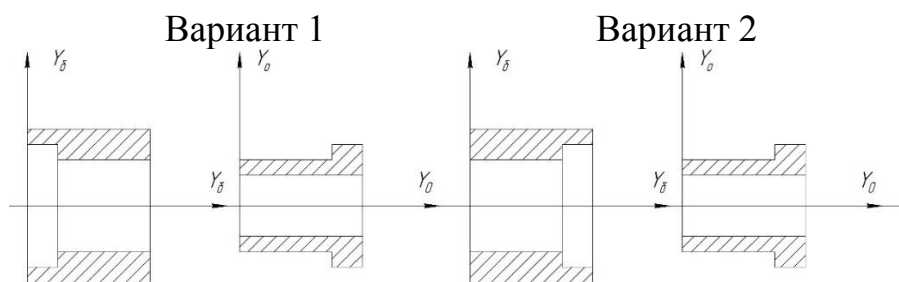


Рис. 1. Варианты ориентации базовой детали

Для формообразующей системы станка описываемой характеристическим кодом [4] обязательным условием является наличие возможности перемещения исполнительных органов вдоль оси Z для обеспечения сопряжения подлежащих сборке деталей. Как правило, согласно описанию формообразующих возможностей станка с помощью матриц преобразования [4], перемещение исполнительных органов станка описывается следующей матрицей преобразования:

$$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

где, l_z – линейное перемещение вдоль оси Z.

Основным параметром, характеризующим процесс сборки продольно прессового соединения, является усилие необходимое для осуществления данного сопряжения. Таким образом, исполнительные механизмы станка, посредством которых будет осуществляться непосредственно запрессовка должны обеспечивать необходимое усилие.

В таблице 1 представлены силовые характеристики механизмов подачи металлообрабатывающих станков, применяющихся на предприятиях.

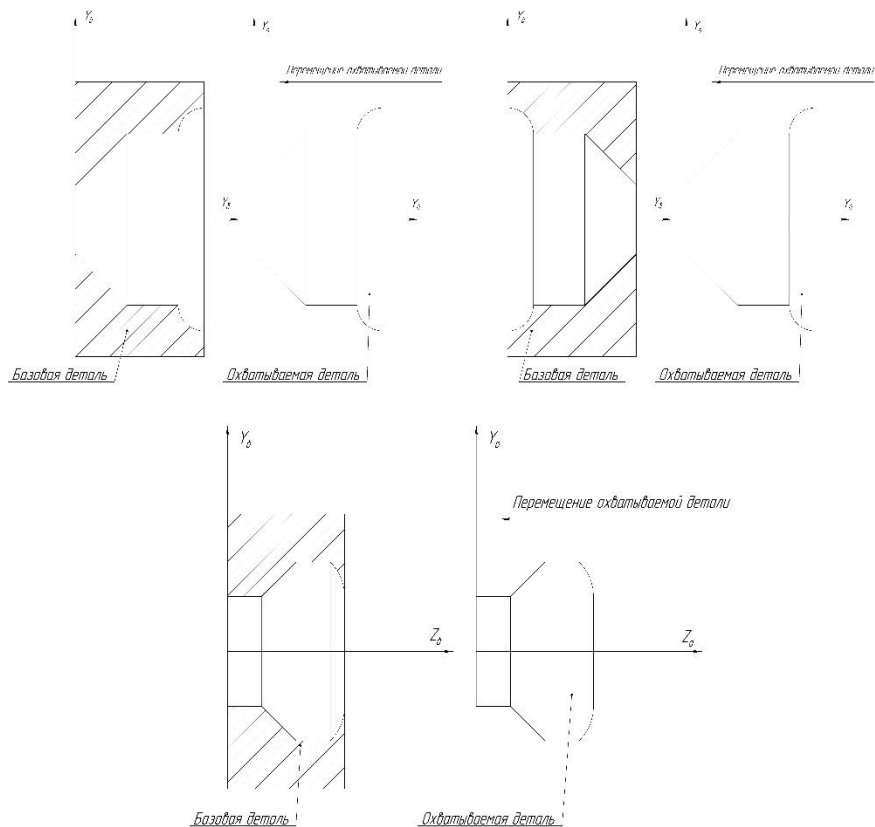


Рис. 2. Варианты геометрии сопрягаемых поверхностей

В таблицу включены станки, принадлежащие разным группам. Как видно из представленных цифр, металлорежущее оборудование способно обеспечить усилие порядка 5,5-20 кН, что вполне достаточно для обеспечения сборки большинства узлов, относящихся к продольно прессовым.

Таблица 1 Силовые характеристики исполнительных механизмов металлорежущих станков

Наименование станка	Максимальное усилие подачи, Н
Станки токарной группы:	
1П426ДФЗ	20 000
1К62	5 500
Harding Talent 10/78	9 350
Станки фрезерной группы:	
67К25ПФ2-0	9500
6Р11	10 000
6Н13	20 000
Станки расточной группы:	
255МФ2	15 000
ИР800МФ4	10 000
Обрабатывающие центры:	
800 VHT	8 000
100 VHT	12000
ИСБ 800	12 500

Выводы: в ходе проведенных исследований и анализа были выделены требования к металлорежущему оборудованию, используемому для операций, основанных на методике концентрации обработки и сборки. Так же был выделен ряд требований, касающихся геометрии сопрягаемых деталей. В результате, опираясь на приведенные требования можно дать заключение о возможности осуществления сборки конкретного изделия посредством того или иного металлообрабатывающего оборудования.

Список литературы

[1] *Базров Б.М., Демин А.Б.* Определение технологических возможностей станка. *Вестник машиностроения*, 2007, №3, С. 47-50.

[2] *Мальшев Е.Н., Бысов С.А.* Обоснование принятия решения о концентрации обработки и сборки на одном станке // Сборка в машиностроении приборостроении. – 2010. –№11. – С. 41-17.

[3] *Бысов С.А., Юхимец Р.М.* Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана 2016. – С. 4-7

[4] *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

[5] *Новиков М.П.* Основы технологии сборки машин. – М.: Машиностроение, 1980. –586 с.

Юхимец Роман Михайлович – студент КФ МГТУ им.Н.Э. Баумана.
E-mail: LeoBonart10@yandex.ru

Бысов Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Т.В. Попова, А.Г. Вяткин

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА БОЧКООБРАЗНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Холодная объемная штамповка (ХОШ) широко используется в заготовительном производстве. Применение ХОШ совместно с другими штамповочными операциями позволяет получить законченные детали, не требующие или почти не требующие дальнейшей механической обработки. Штампованные детали отличаются повышенной точностью и низкой шероховатостью поверхности, четким контуром, а также повышенной прочностью и жесткостью в результате упрочнения при холодной деформации. Осадка является одной из наиболее часто используемых операций холодной объемной штамповки.

Одним из важных параметров заготовки при осадке является бочкообразность - это отклонение формы, вызванное непрямолинейностью образующих, при которой диаметры увеличиваются от торцов к середине продольного сечения. [6]

Напряженное состояние металла при осадке цилиндрических заготовок на плоских плитах определяется, прежде всего, условиями внешнего трения и фактором формы заготовки $\frac{h}{D}$ или $\frac{D}{h}$ (отношение диаметра к высоте) и фактором тонкостенности заготовки $\frac{S}{h}$ (отношение толщины к высоте), которые в совокупности определяют граничные условия.

При отсутствии сил внешнего трения или при очень малой величине напряженное состояние металла при осадке характеризуется схемой линейного сжатия (рисунок 1, а) или близкой к нему и не зависит от фактора формы заготовки.

При наличии внешнего трения схема напряжений в различных участках объема поковки неодинакова. При этом она сильно изменяется от формы заготовки (рисунок 1, б, в).

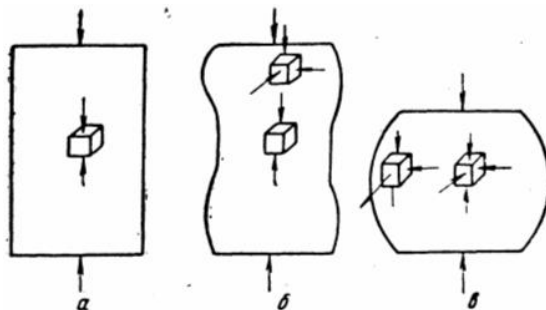


Рис. 1. Схемы напряжений при осадке цилиндрических заготовок:

а – равномерная осадка; б – неравномерная осадка при $\frac{h_0}{D_0} = 2$;

в – то же при $\frac{h_0}{D_0} = 1$

Схема объемного сжатия появляется в результате действия сил внешнего трения. Однако при осадке высоких заготовок действие сил внешнего трения в соответствии с принципом Сен-Венана затухает по мере удаления от контактных поверхностей. Это объясняется тот факт, что при осадке высоких заготовок в середине высоты заготовки имеется схема линейного напряженного состояния. При осадке низких заготовок почти весь объем поковки находится под действием всестороннего неравномерного сжатия. При этом, чем меньше высота заготовки по отношению к диаметру, тем более резко выражена схема объемного сжатия и тем больше абсолютная величина среднего гидростатического давления.

Изменение граничных условий, сопровождаемое изменением напряженного и деформированного состояния, подтверждает целесообразность разделительного анализа деформации цилиндрических заготовок с различным соотношением $\frac{h}{D}$, а именно:

1. Высокие заготовки при $\frac{h}{D} > 1,5 - 2$. Отличительной особенностью процесса осадки таких цилиндров является двойное бочкообразование при отсутствии смазки.

2. Заготовки умеренной высоты при $0,3 - 0,4 < \frac{h}{D} < 1,5 - 2$. Для этих заготовок характерно одинарное бочкообразование. При осадке на сухих шероховатых плитах почти вся контактная поверхность представляет собой зону прилипания.

3. Низкие заготовки при $\frac{h}{D} < 0,3 - 0,4$. При осадке на сухих шероховатых плитах в этом случае также имеет одинарное бочкообразование. Однако на значительной части контактной поверхности развивается скольжение, а у очень тонких цилиндров скольжение практически охватывает всю контактную поверхность.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния на бочкообразность при холодной осадке таких факторов, как относительные размеры заготовки, степень деформации и скорость деформирования.

В ходе эксперимента выполнялась холодная осадка заготовок. В качестве оборудования использовался гидравлический пресс П481А, номинальная сила которого 100 кН. В качестве деформируемых заготовок использовались металлические цилиндрические сплошные детали из материала АД31 ($\sigma_s = 600$ МПа [2]).

Холодная осадка производилась на различной скорости (минимальная $v = 4$ мм/сек, максимальная $v = 118$ м/сек), с различными степенями деформации ($\varepsilon = 0,1$; $\varepsilon = 0,36$), и относительными размерами ($\frac{d}{h} = 1,5$; $\frac{d}{h} = 3$). Настройка прессы на необходимую высоту h производилась по несмазан-

ным заготовкам. Затем производилась холодная осадка с применением смазки (технический вазелин + графит). Откликом в эксперименте являлась относительная бочкообразность не смазанной и смазанной заготовок после деформирования. Результаты эксперимента обрабатывались методом регрессионного анализа.

После выполнения математической обработки эксперимента было получено следующее уравнение регрессионного анализа:

$$y(\delta d) = 0,13 + 0,34x_1(\varepsilon) - 0,2x_2\left(\frac{d}{h}\right) + 0,36x_3(v) + 0,32x_1x_2\left(\frac{d}{h} \cdot \varepsilon\right) + 0,37x_2x_3\left(\frac{d}{h} \cdot v\right) - 0,29x_1x_3(\varepsilon \cdot v) - 0,31x_1x_2x_3\left(\varepsilon \cdot \frac{d}{h} \cdot v\right) \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения регрессии показаны на рисунке (1)

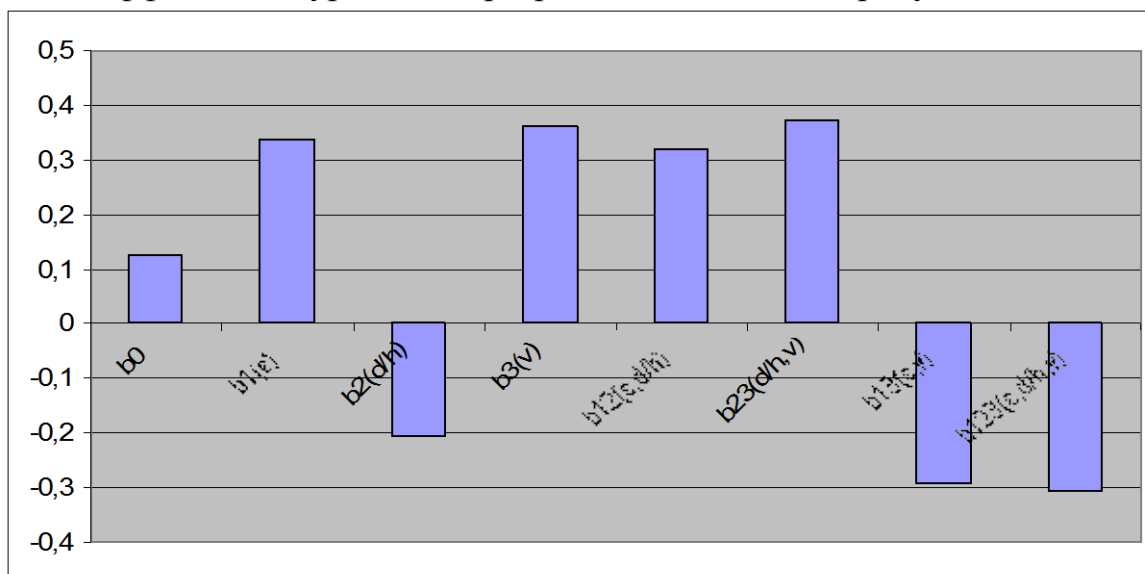


Рис. 1. Соотношения коэффициентов уравнения регрессии

Уравнение (1) показывает, что наибольшее влияние на увеличение бочкообразности при деформировании со смазкой оказывает скорость, причем, чем больше скорость деформации, тем больше увеличивается бочкообразность с применением смазки. Такое же влияние, но незначительно меньшее по силе, оказывает степень деформации заготовки. Относительные размеры заготовки оказывают отрицательное влияние на отклик. Совместное действие степени деформации и относительных размеров, относительных размеров и скорости оказывают положительное влияние на отклик, а совместное действие степени деформации и скорости, и всех исследуемых факторов оказывают отрицательное влияние на бочкообразность, причем сила этих действий сопоставима с силой действий на отклик одиночных факторов. Полученное уравнение соответствует теоретическим исследованиям [4].

Список литературы

[1] *Боровиков С.М.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск: Дизайн ПРО, 1998. 336 с.

[2] *Вяткин А.Г.* Сравнительная оценка точности операций холодной объемной штамповки, выполняемых на кривошипных и гидравлических прессах: дисс. канд. техн. наук: 05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением/ МГТУ «Станкин». М., 2003. 190с.

[3] *Исаченков Е.И.* Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

[4] *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

[5] *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. София: Техника, 1980. 304 с.

[6] *Загиров Н.Н., Рудницкий В.А.* Теория обработки металлов давлением. Конспект лекций. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с.

Попова Татьяна Витальевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: tanechka54321@mail.ru

Вяткин Андрей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

Ю.А. Савина

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривая процессы, протекающие в поверхностных слоях деталей машин, необходимо оценить параметры, которые характеризуют их состояние и по изменению которых можно судить о происходящих явлениях. Эта задача достаточно сложна, как из-за необходимости использовать большое число показателей, так и вследствие их разнообразия по своей физической природе[1].

Необходима теория, которая установит связи между технологией изготовления деталей, и процессами, протекающими в поверхностных слоях в ходе контакта двух поверхностей, и которая позволит в дальнейшем предсказывать характер контакта поверхностей деталей еще на стадии проектирования машины, т.е. создавать поверхности с наперед заданными свойствами.

Одним из рассматриваемых показателей является поверхностная энергия деталей машин. В данном случае необходимо определить зависимость между режимами резания, технологическими операциями и поверхностной энергией с учетом микрогеометрии поверхности деталей.

Для достижения поставленной цели был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ 2^3) по известной методике [2-4], а также была установлена корреляционная связь между шероховатостью поверхностей и их энергетическим состоянием.

В качестве объекта исследования были изготовлены образцы из стали 45. Образцы подвергались термической обработке, обрабатывались на токарном станке в различных условиях: с подачей СОЖ и без подачи СОЖ, с разным радиусом при вершине резца ($R=0,5$ мм и $R=2$ мм). Затем измерялась поверхностная энергия и шероховатость поверхности образцов. Измерения проводились методом, описанным в работах [5-6].

В качестве отклика – выходного параметра технологической системы в первом опыте была принята шероховатость поверхности конструкционного материала – $Y(Ra)$, а во втором – поверхностная энергия конструкционного материала – $Y(\gamma)$. Исследовали следующие факторы, влияющие на отклик: $X_1(HRC)$ – твердость, $X_2(R, \text{мм})$ – радиус при вершине резца, $X_3(\text{СОЖ})$ – подача СОЖ. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты ПФЭ 2³

№	X ₁ (HRC)	X ₂ (R, мм)	X ₃ (СОЖ)	Повторные опыты			\bar{Y}	S _t ²
				Y ₁ (Ra)	Y ₂ (Ra)	Y ₃ (Ra)		
1	40	0,5	без	0,96	1,03	1,097	1,0291	0,00469
2	40	0,5	сож	0,954	0,965	0,946	0,95	0,00013
3	40	2	без	3,735	3,774	3,732	3,747	0,00055
4	40	2	сож	2,95	3,024	3,089	3,021	0,00484
5	54	0,5	без	1,499	1,526	1,485	1,50333	0,00043
6	54	0,5	сож	0,945	0,912	0,907	0,92133	0,00043
7	54	2	без	0,792	0,842	0,856	0,83	0,00113
8	54	2	сож	1,171	1,028	1,1003	1,09977	0,00511
Σ								0,01731

Для исключения грубых погрешностей каждый опыт повторялся 3 раза.

Была получена следующая математическая модель в виде уравнения регрессии, определяющая зависимость отклика (Ra) от исследуемых факторов:

$$Y(Ra) = 1,638 + 0,139 \cdot X_1(HRC) - 0,537 \cdot X_2(R) + 0,549 \cdot X_3(СОЖ) + 0,026 \cdot X_1X_2(HRC \cdot R) + 0,062X_1X_3(HRC \cdot СОЖ) - 0,661 \cdot X_2X_3(R \cdot СОЖ) - 0,187 \cdot X_1X_2X_3(HRC \cdot R \cdot СОЖ)$$

Регрессионный анализ показывает, что наибольшее влияние на отклик оказывает X₂(R) – радиус при вершине резца и X₃(СОЖ) – подача СОЖ при обработке образцов и их взаимодействие X₂X₃(R · СОЖ), влияние этих факторов почти в 4 раза сильнее влияния X₁(HRC) – твердости поверхности и сильнее влияния эффекта взаимодействия этих факторов. Из уравнения следует, что с подачей СОЖ и при использовании резца с радиусом при вершине R=2 шероховатость уменьшается. Степень и характер влияния факторов на отклик проиллюстрирован на рис. 1.

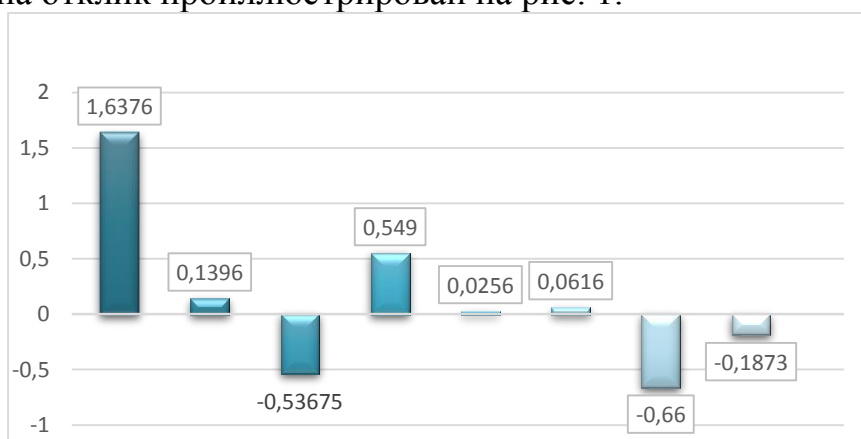


Рис.1. Диаграмма коэффициентов математической модели шероховатости

Обработка второй части результатов эксперимента (см. табл. 2) выполнялась аналогично.

Таблица 2. Результаты ПФЭ 2³

№	X ₁ (HRC)	X ₂ (R, мм)	X ₃ (СОЖ)	Повторные опыты			\bar{Y}	S _i ²
				Y ₁ (γ)	Y ₂ (γ)	Y ₃ (γ)		
1	40	0,5	без	1509,695	1512,543	1517,291	1513,176	14,72564
2	40	0,5	сож	1508,746	1505,898	1506,847	1507,164	2,102984
3	40	2	без	1510,645	1510,645	1517,291	1512,86	14,72311
4	40	2	сож	1495,454	1496,403	1503,999	1498,619	21,93614
5	54	0,5	без	1501,151	1522,987	1527,734	1517,291	201,0001
6	54	0,5	сож	1494,505	1505,898	1507,796	1502,733	51,67559
7	54	2	без	1505,898	1510,645	1489,758	1502,1	119,8834
8	54	2	сож	1508,746	1505,898	1507,796	1507,48	2,102668
Σ								428,1497

Аналогично было получено второе уравнение регрессии.

$$Y(\gamma) = 1507,678 + 3,679 \cdot X_1(\text{HRC}) + 2,413 \cdot X_2(\text{R}) + 0,276 \cdot X_3(\text{СОЖ}) + 1,463 \cdot X_1X_2(\text{HRC} \cdot \text{R}) + 1,384X_1X_3(\text{HRC} \cdot \text{СОЖ}) - 0,198 \cdot X_2X_3(\text{R} \cdot \text{СОЖ}) - 3,52 \cdot X_1X_2X_3(\text{HRC} \cdot \text{R} \cdot \text{см})$$

Полученная модель показывает, что наибольшее влияние на отклик оказывает взаимодействие факторов X₁X₂X₃(HRC · R · см) и X₁(HRC) – твердость поверхности образца, влияние этого фактора в 1,5 раза сильнее влияния X₂(R) – радиус вершины резца. Степень и характер влияния факторов на отклик проиллюстрирован на рис. 2.

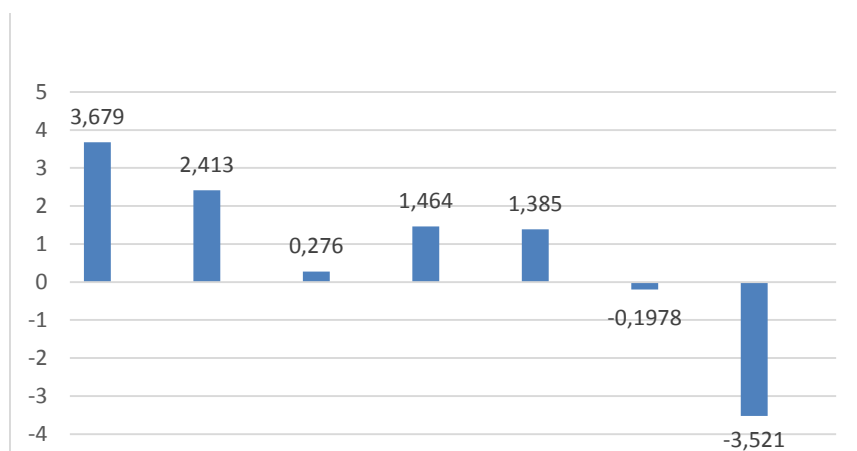


Рис. 2. Диаграмма коэффициентов математической модели поверхностной энергии

Чтобы установить существует ли взаимная зависимость между шероховатостью и поверхностной энергией был проведен **корреляционный анализ** по известной методике [7].

Корреляционная связь – это согласованное изменение двух признаков, отражающее тот факт, что изменчивость одного признака находится в соответствии с изменчивостью другого

Общая классификация корреляционных связей:

- сильная, или тесная при коэффициенте корреляции $r > 0,70$;
- средняя при $0,50 < r < 0,69$;

- умеренная при $0,30 < r < 0,49$;
- слабая при $0,20 < r < 0,29$;
- очень слабая при $r < 0,19$.

В рассматриваемом случае $r=0,333(3)$ показывает умеренную взаимосвязь между шероховатостью поверхности и поверхностной энергией. Однако, то что рассчитанный коэффициент корреляции рангов r оказался меньше t критерия свидетельствует о том, что он статистически незначим.

Таким образом, нельзя утверждать, что существует убедительная связь между поверхностной энергией и шероховатостью поверхности нельзя. Однако, полученные математические модели позволяют назначать направление и изменение факторов для эффективного управления микрогеометрией поверхностей и накопление требуемого значения поверхностной энергией.

Список литературы

[1] *Мусохранов М.В., Савина Ю.А.* Методика проведения эксперимента для анализа факторов влияющих на качество поверхности // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Всероссийская научно-техническая конференция, 15 - 17 ноября 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 40-42. - URL: http://conference.bmstu-kaluga.ru/uploads/userfiles/december_2016_1.pdf (дата обращения: 01.03.2017);

[2] *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.

[3] *Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Федоров В.А.* Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 12. С. 171–180. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/739192.html> (дата обращения: 01.03.2017);

[4] *Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И.* Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессах // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 6. С. 13-18

[5] *Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Сорокин С.П.* Энергетические показатели качества деталей машин и методы их измерения // Фундаментальные исследования. 2015. № 10-1. С. 43-49; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39121> (дата обращения: 01.03.2017). DOI: 10.17513/fr.39121.

[6] *Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Логутенкова Е.В., Сорокин С.П.* Энергетическое состояние поверхностного слоя деталей машин // Современные научные технологии. 2016. № 5-2. С. 276-279.

[7] *Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.

Савина Юлия Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ulia1158@yandex.ru

Д.А. Барина, И.В. Кузнецов

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современных условиях непрерывного развития машиностроительного производства снижение затрат труда при высоком качестве продукции является критерием совершенства технологии и организации труда. Нормирование труда следует рассматривать как многоаспектную категорию, на которую влияет множество факторов [3]. Правильно рассчитанная норма может стимулировать повышение производительности труда.

В целях изучения всего многообразия затрат рабочего времени предусмотрена единая классификация затрат рабочего времени.

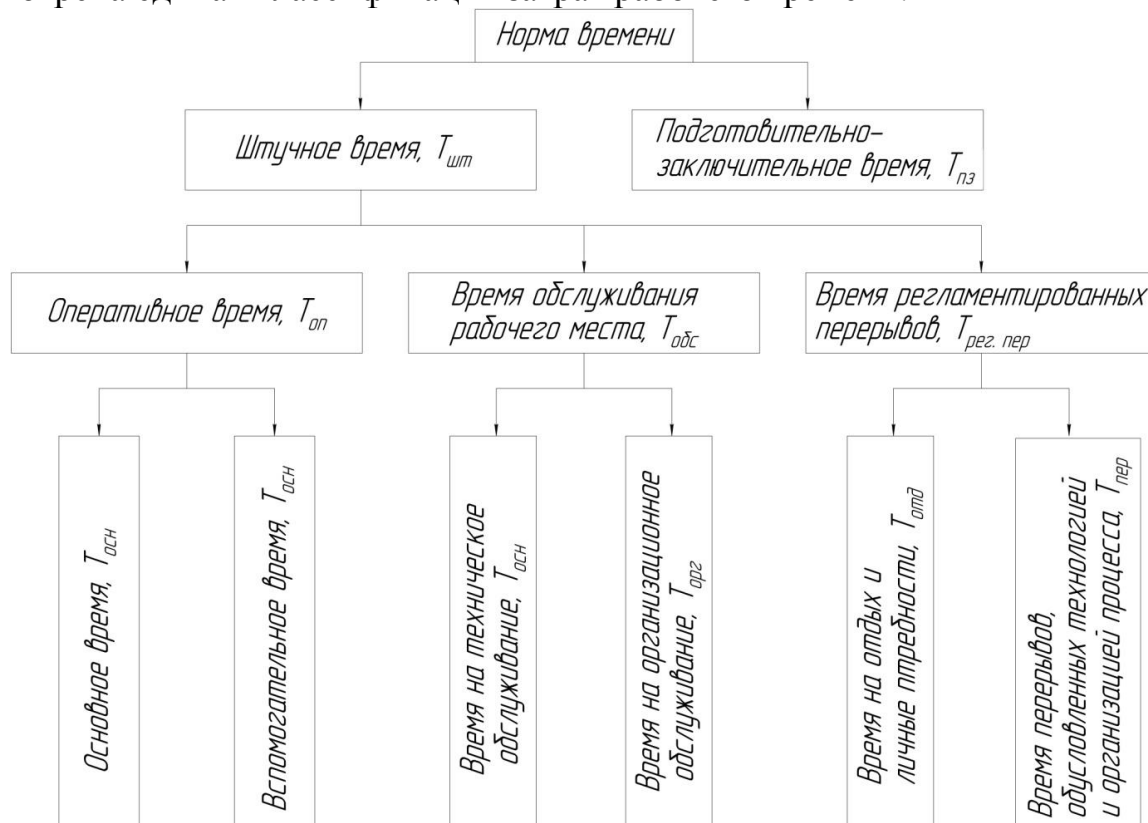


Рис. 1. Классификационная схема затрат рабочего времени

В ходе выполнения обработки заготовок происходит интенсивное трение поверхностей режущей части инструмента об обработанную поверхность и поверхность резания, а также трение стружки о переднюю поверхность. Процесс трения сопровождается значительным выделением тепла за счет трения и пластического деформирования срезаемого слоя металла [3]. Эти явления приводят к износу инструмента по передней и зад-

ним поверхностям. Значительный износ режущего инструмента приводит к необходимости его замены.

Время на замену инструмента вследствие потери им режущих свойств является одной из составляющих времени на техническое обслуживание рабочего места согласно классификационной схеме (рис.1).

В общем случае время технического обслуживания определяется по формуле [1, 2]:

$$t_{тех.обс} = t_{см} + t_{под} + t_{струж} \quad (1),$$

где $t_{см}$ – время на смену инструмента вследствие потери им режущих свойств, отнесенное к одной детали; $t_{под}$ – время подналадки режущего инструмента, связанное с износом режущей части; $t_{струж}$ – время на сметание и периодическую уборку стружки в процессе работы.

В настоящее время на многоинструментальных станках с ЧПУ используется традиционная методика замены затупившегося инструмента, согласно которой инструмент заменяют по мере необходимости. Однако, если при разработке технологической операции рассчитать режимы резания каждого инструмента таким образом, чтобы стойкость каждого инструмента была одинаковой, то станет возможной единовременная смена инструментального магазина комплектом инструментов. Это позволит существенно сократить время обслуживания рабочего места и повысить эффективность использования инструмента.

Список литературы

[1] Пахомов Д.С., Гребнева Т.Н. Особенности нормирования операций станков с ЧПУ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. №2. С. 104-112.

[2] ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: Издательство стандартов, 2003.

[3] Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования станочных работ. – М.: Машиностроение, 1974.

Барина Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru

Н.В. Зенкин, И.А. Варичкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СОЖ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Эффективность металлообработки – комплексный показатель, в который также входит влияние смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). СОЖ влияет на качество изделий, производительность труда и другие технико-экономические показатели процессов обработки металлов резанием [1].

Самое главное требование, предъявляемое к СОЖ – это увеличение стойкости режущего инструмента и повышение качества обрабатываемой поверхности при соблюдении заданной точности обработанной поверхности [2].

При достижении этих требований можно значительно снизить стоимость металлообработки из-за сокращения затрат на инструмент, уменьшения брака и простоя, связанного с заменой инструмента. В зависимости от условий обработки СОЖ оказывает смазывающее, охлаждающее, моющее действие [3].

Проведение эксперимента по выявлению влияния различных видов СОЖ на шероховатость поверхности при фрезеровании.

С целью определения влияния различных видов СОЖ на шероховатость при фрезерной обработке, была проведена обработка на вертикально-обрабатывающем центре. При этом применялась концевая фреза $\varnothing 19$ мм с пластинами из твердого сплава. В качестве заготовки использовалась пластина из стали Ст3.



Рис. 1. Процесс обработки заготовки с использованием СОЖ

Эксперимент повторялся 4 раза с применением различных видов СОЖ: смазочно-охлаждающая жидкость марки FUCHS ECOCOOL 68 CF 2, масло, вода и без применения СОЖ. Обработка производилась в 2 этапа. Первый участок обрабатывался при величине подачи $S_1 = 0,02$ мм/зуб, а второй участок при величине подачи $S_2 = 0,06$ мм/зуб.



Рис. 2. Пример обработанного участка

После выполнения обработки и очистки заготовки, была измерена шероховатость (R_a) на всех участках обработки с помощью профилометра.

На каждом участке измерения проводились по 3 раза, после чего было определено среднее значение шероховатости (R_a). Обработав данные, получились следующие значения шероховатости, при использовании различных видов СОЖ, в зависимости от подачи:

$S_1 = 0,02$ мм/зуб			$S_2 = 0,06$ мм/зуб	
1. Вода	– $R_a = 0,518$ мкм		1. СОЖ	– $R_a = 0,307$ мкм
2. Масло	– $R_a = 0,620$ мкм		2. Масло	– $R_a = 0,650$ мкм
3. Без СОЖ	– $R_a = 0,631$ мкм		3. Без СОЖ	– $R_a = 0,688$ мкм
4. С СОЖ	– $R_a = 0,634$ мкм		4. Вода	– $R_a = 0,754$ мкм

Для уточнения полученных данных было проведено дополнительное экспериментальное исследование. Условия проведения эксперимента остались такие же, как и в первом случае, кроме значений подач. Каждый участок обрабатывался в 2 этапа - с использованием СОЖ марки FUCHS ECOCOOL 68 CF 2 и без использования СОЖ. Всего было 6 участков, каждому соответствовало значение подачи 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,12 мм/зуб соответственно.

Измерение шероховатости также производились с помощью профилометра. На каждом участке измерения проводились по 3 раза, после чего было определено среднее значение шероховатости (R_a , мкм). После обработки данных были получены следующие значения шероховатости в зависимости от величины подачи:

Таблица 1. Изменение шероховатости в зависимости от величины подачи.

Измеряемый параметр \ Подача, мм/зуб	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
Среднее значение шероховатости обработки с СОЖ	0,53	0,38	0,41	0,72	1	1,27
Среднее значение шероховатости обработки без СОЖ	0,65	0,71	0,79	1	1,1	1,2

Графически результаты эксперимента представлены на рис. 3

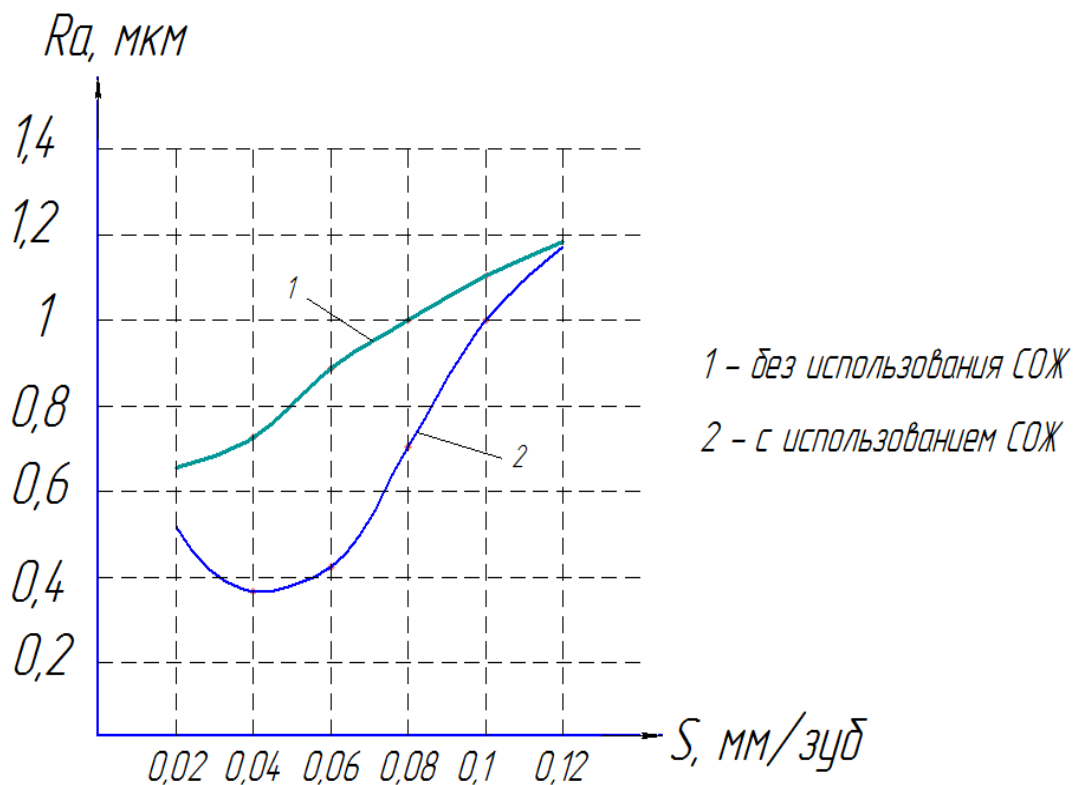


Рис. 3. График зависимости шероховатости от изменения значения подачи при данных условиях обработки

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что использование СОЖ наиболее эффективно в диапазоне подач – 0,04...1 мм/зуб, что дает существенное улучшение шероховатости, по сравнению с другими видами СОЖ или без использования каких-либо СОЖ. При значении по-

дачи $S < 0,04$ мм/зуб и $S > 1$ мм/зуб использование СОЖ не дает существенного улучшения шероховатости поверхности, поэтому применение СОЖ при таких подачах нецелесообразно.

Список литературы

[1] Бердический Е.Г. *Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов*. Справочник. Москва, Машиностроение, 2004. – 58 с.

[2] Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием*. Справочник. Москва, Машиностроение 1986. – с. 115-117.

[3] Худобин Л.В., Бабичев А.П., Булыжев Е.М. *Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием*. Справочник. Москва, Машиностроение, 2006, 544с.

Зенкин Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivan.varichkin@rambler.ru

Варичкин Иван Алексеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivan.varichkin@rambler.ru

М.В. Крюков

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Измерения углов тонкостенных деталей на практике сталкивается с рядом трудностей. К таким трудностям относят: низкая жесткость тонкостенных деталей, труднодоступность, измерение углов от осей и т.д.

При изготовлении тонкостенных деталей часто возникает необходимость контроля угловых размеров. При угловой гибке (рис. 1) необходимо контролировать угол гибки после пружинения материала.

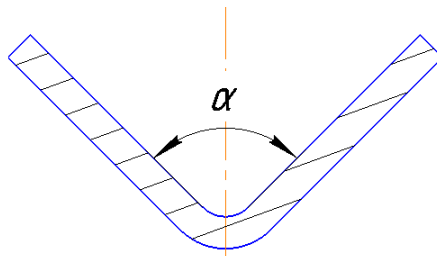


Рис. 1. Угловая гибка

При вырубке (рис. 2) необходимо контролировать угловое положение отдельных элементов, особенно при вырубке отдельных элементов за несколько установов.

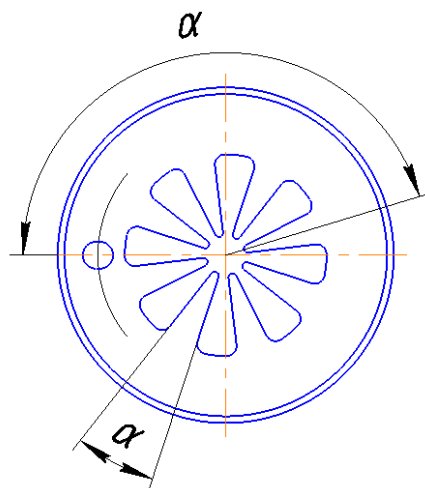


Рис. 2. Вырубка

При вытяжке (рис. 3) необходимо контролировать угол вытяжки элементов относительно плоскости штампа.

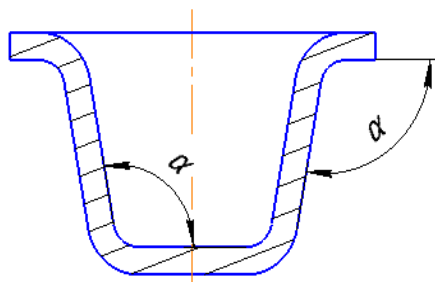


Рис. 3. Вытяжка

По способу измерения все методы делятся на прямые и косвенные.

Прямой метод характеризуется тем, что измеряемое значение физической величины находят, непосредственно сравнивая с различными мерами. К прямым методам относят метод непосредственной оценки.

При косвенном методе искомое значение вычисляется из других измеренных величин. К косвенным методам относят метод сравнения с мерой и тригонометрический метод.

Для измерения угловых размеров используют один из трех, наиболее распространенных методов [1]:

1. Метод непосредственной оценки с помощью штриховой меры (гонометрический метод)
2. Метод сравнения с жесткой мерой
3. Тригонометрический метод

При методе непосредственной оценки значение искомой величины определяют непосредственно по измерительному средству прямого действия. При использовании первого метода используют круглую или линейную угломерную шкалу. Измеряемая шкала должна вписываться в измеряемый угол. В измерениях такого типа используют: угломеры, инструментальные микроскопы, оптические делительные столы (ОДС), измерительные проекторы и др.

Угломеры предназначены для измерения углов в пределах 180° . Угломер является контактным измерительным средством. Недостаток угломера заключается в том, что на точность измерения влияет качество прилегающих к углу поверхностей и их протяженность. Погрешность измерения такого прибора $\pm 2'$.

Измерительные проекторы предназначены для измерения угловых и линейных размеров изделий со сложным профилем. Проекторы позволяют получать увеличенное изображение деталей на экране. Погрешность измерения такого прибора $\pm 3'$.

Инструментальный микроскоп относится к группе оптико-механических приборов. Предназначен для измерения линейных и угловых размеров в полярной и прямоугольной системах координат. Погрешность измерения с помощью инструментального микроскопа $\pm 3'$.

ОДС представляет собой оптический измерительный прибор. Особенность которого заключается в том, что отсчет углового размера производится

по точно градуированному оптическому лимбу, а поворот стола с деталью осуществляется с помощью высокоточной червячной передачи. Погрешность измерения с помощью оптического делительного стола не превышает 15".

При втором методе измеряемый угловой размер сравнивают с мерой, хранящей величину с наперед заданной точностью. При сравнении углов жесткой мерой отклонения определяют по просвету между сторонами детали и меры. При таком методе наиболее распространены: угловые калибры и угловые плитки.

Угловые плитки представляют собой трех или четырехгранные призмы. Угловые плитки выпускаются набором. Для измерения плитки собираются в блоки. Точность измерения с помощью угловых плиток составляет 30".

Угловые калибры применяют для контроля определенных углов. Размер углов должен соответствовать размерам калибра. Точность измерения зависит от качества и протяженности измеряемых поверхностей, а также точности изготовления калибра.

Тригонометрический метод основан измерении линейных расстояний и последующих вычислениях углов из определенных соотношений [2]. Также при таком методе могут линейные размеры заменяться на соответствующие координаты вершин отрезков. Наиболее часто при измерениях тригонометрическим методом используют синусные линейки.

Синусные линейки предназначены для измерения наружных углов от 0 до 45°. Погрешность измерения с помощью синусных линеек составляет $\pm 15''$.

Таким образом каждый метод измерения и измерительный инструмент подходит для определенного вида деталей. Для угловой гибки подходят различные инструменты: при хорошем качестве поверхности можно применять угломеры и угловые калибры. В последнем случае требуется чтобы угол можно было сложить из имеющихся калибров. При невысоком качестве поверхности или при измерениях высокой лучше применять измерительный проектор, ОДС или инструментальный микроскоп. В случае вытяжки деталей больших размеров то возможно применять те же инструменты что и при угловой гибке. При измерении деталей небольшой формы необходимо использовать угловые меры, плитки или изготавливать специальные шаблоны. При вырубке можно использовать те же инструменты что и в предыдущих деталях. В труднодоступных местах возможно использование тригонометрического метода. При этом определение координат необходимых для измерения точек в зависимости от заданной точности можно определять с помощью линеек или микроскопа.

Список литературы

[1] *Сергеев А.Г., Терегеря В.В.* Метрология, стандартизация и сертификация – М.: Юрайт, 2010 – 817 с.

[2] *Балонкина И.И., Кутай А.К., Сорочкин Б.М.* Точность и производственный контроль в машиностроении – Л.: Машиностроение, 1983 – 368 с.

Крюков Максим Викторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: cloundead@gmail.com

Т.А. Говорун, В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков,
К.Б. Добросовестнов, О.П. Баженова, В.А. Богачев

МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАХОЖДЕНИИ НА ЦЕЛЕВОЙ ОРБИТЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время актуальной задачей является повышение надежности механизмов раскрытия элементов космических аппаратов (КА). Элементы узлов раскрытия находятся в статическом контакте, однако подвергаются фреттинг-износу на этапе запуска КА. В большинстве случаев в конструкции узлов раскрытия используются сплавы легких металлов. Они сильно склонны к адгезии. При разрушении защитных покрытий и длительном нахождении в вакууме может возникнуть холодная сварка.

Американские ученые проводили эксперименты, чтобы установить, как воздействуют на различные металлы условия космического пространства, в частности, глубокий вакуум. Образцы исследуемых материалов помещали в вакуумную камеру с давлением, соответствующим разрежению на высоте 800 км над Землей. Эти опыты показали, что металлы, плотно прижатые друг к другу, в безвоздушной среде за несколько дней прочно свариваются [1].

Возникновение адгезии связано с физическими и механическими свойствами материалов. Экспериментальные данные указывают на то, что адгезия минимальна, когда контактирующие материалы имеют высокую твердость, высокий модуль упругости и низкую пластичность [2].

В настоящее время для предотвращения холодной сварки на ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» применяются твердые смазочные покрытия (ТСП) на основе дисульфида молибдена типа ВНИИ НП-230.

Были изучены данные европейских ученых из Европейского космического агентства (ЕКА) [3], которые исследовали силу адгезии между различными защитными покрытиями на конструкционных материалах, которая возникает в условиях удара и фреттингового износа. Результаты исследований показывают, что ТСП плохо сохраняются в условиях фреттингового износа, а поврежденное покрытие неэффективно в предотвращении схватывания контактирующих поверхностей, особенно при длительном контакте, который имеет место при полете к другим планетам Солнечной системы, а также при отложенном раскрытии конструкций космических аппаратов на земной орбите.

В истории космонавтики известен ряд случаев, когда холодная сварка контактирующих поверхностей в условиях околоземного пространства приводила к выходу из строя отдельных систем космических аппаратов и даже ставила под угрозу выполнение полетной программы.

Во время работы КА «Surveyor I» на лунной поверхности потенциометр, который использовался для обозначения положения оси азимута, показал признаки неисправности после работы в течение 100 часов из-за проблемы со смазочными материалами. В 1961 году ВВС США попытались вывести на орбиту 50 фунтов игл из тонкой медной проволоки в ходе эксперимента West Ford. Эксперимент не был успешным, одна из версий – иглы оказались приварены друг к другу из-за адгезии в вакууме. Во время полета космического корабля «Gemini 4» люк для выхода астронавтов в открытый космос заклинило. Заклинивание могло быть вызвано холодной сваркой петель люка. Один шарнирный элемент был выполнен из титана, для другого элемента использовался алюминиевый сплав. Сухая смазка наносилась на трущиеся поверхности, чтобы предотвратить схватывание. Было доказано, что слой смазочного материала был случайно удален перед запуском, вследствие чего возникла адгезия элементов петель люка [2].

Отказ из-за холодной сварки после фреттинг-износа произошел на КА «Galileo» в 1991 году, когда антенна с высоким коэффициентом усиления не смогла полностью раскрыться. Элементы антенны, зафиксированные в транспортном положении, не смогли раскрыться после 1,5 лет пребывания в космосе. Исследования показали, что фреттинг-износ в элементах раскрытия антенны во время транспортировки КА к космодрому и выведения ракетой-носителем на перелетную орбиту способствовал возникновению холодной сварки [4].

Имеются сведения [3] об исследованиях керамических покрытий в качестве способа предотвращения схватывания контактирующих поверхностей металлов. На поверхности металлов вентильной группы был сформирован керамический слой при помощи микродугового оксидирования (так называемый европейцами Керонит). Было установлено, что достаточно толстый оксидный слой на алюминиевых и титановых сплавах обеспечивает надежную защиту от адгезии при фреттинг-нагрузке.

Известно [5], что диффузионная сварка керамических материалов без применения металлических промежуточных слоев происходит при температуре около 1600°C, что гораздо выше температур, при которых эксплуатируются механизмы КА, поэтому возможность схватывания контактирующих керамических поверхностей в процессе эксплуатации механизмов КА исключена. Остается экспериментально подтвердить сохраняемость и отсутствие повреждений керамических поверхностей на всю их глубину под действием фреттинг-износа и нагрузок, возникающих в процессе транспортирования КА, чтобы гарантировать, что контактирующие поверхности не сварятся, и узлы раскрытия будут функциональны при длительной выдержке в условиях космического пространства в зачеканном состоянии.

Наиболее перспективным методом формирования керамического слоя на поверхности контактирующих деталей из алюминиевых, магниевых или титановых сплавов представляется микродуговое оксидирование (МДО).

Микродуговое оксидирование (МДО) – сравнительно новый вид поверхностной обработки и упрочнения металлических материалов, берущий

свое начало от традиционного анодирования и, соответственно, относится к электрохимическим процессам. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия. [6]

Был проведен эксперимент по определению сохраняемости ТСП на упоре из нержавеющей стали, а также МДО-покрытия на пластине из алюминиевого сплава АМг6 при условии их контакта на вибрационных режимах, соответствующих выведению КА ракетой-носителем, при помощи специально спроектированного приспособления (рис. 1).

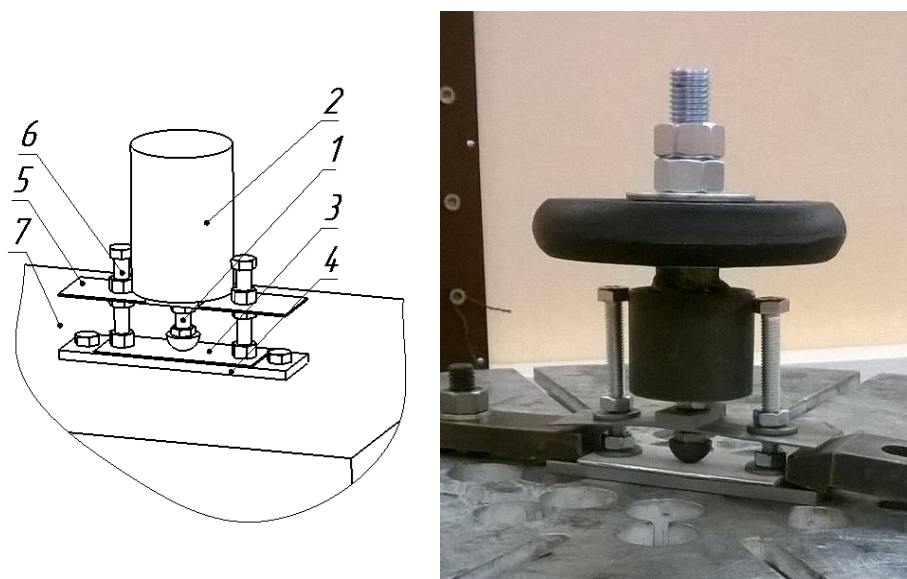


Рис. 1. Приспособление для виброиспытаний:
1 – упор, 2 – груз, 3 – пластина-образец, 4 – пластина нижняя,
5 – пластина верхняя, 6 – болт, 7 – вибростенд

ТСП на основе дисульфида молибдена ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 толщиной (15 ± 5) мкм нанесено по У72-5843ТУ на поверхность упора 1 (рис. 1) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Для эксперимента была изготовлена пластина-образец из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 2 мм с размерами 100x100 мм. На пластине-образце в ванне с электролитом было сформировано МДО-покрытие с толщиной рабочего слоя 170–200 мкм.

Вибрационному нагружению, соответствующему режимам выведения КА ракетой-носителем, подвергался рабочий слой МДО-покрытия (общая толщина покрытия 170–200 мкм) и технологический слой МДО-покрытия (общая толщина покрытия 260–275 мкм).

После проведения виброиспытаний изучали износ контактировавших поверхностей. Фотография износа ТСП на основе дисульфида молибдена ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 на поверхности упора из нержавеющей стали 12Х18Н10Т представлена на рис. 2. Можно видеть, что в пределах пятна контакта ТСП полностью стерлось до металла.

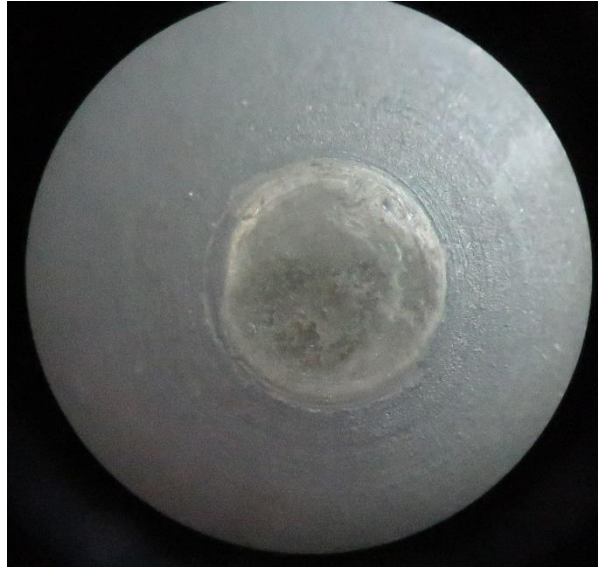


Рис. 2. ТСП на основе дисульфида молибдена ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 на поверхности упора из нержавеющей стали 12Х18Н10Т после виброиспытаний

Для определения глубины износа МДО-покрытия поперечные микрошлифы МДО-покрытия на поверхности пластины-образца изучали на инвертированном металлографическом микроскопе отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT. Фотографии микрошлифов приведены на рис. 3. На них видно, что и двухслойное, и трехслойное МДО-покрытия также стерты до металлической подложки.

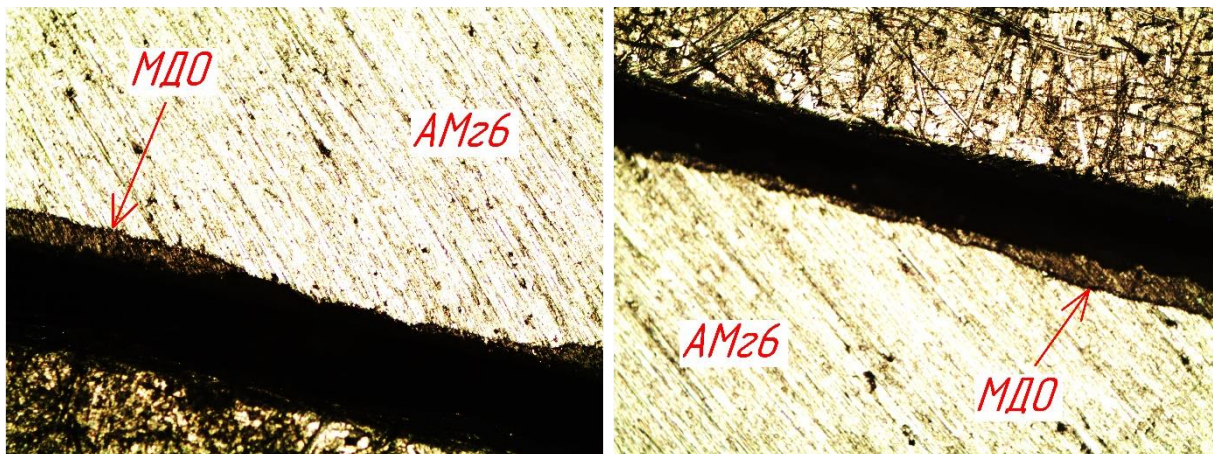


Рис. 3. Поперечные микрошлифы МДО-покрытий на поверхности пластины-образца из алюминиевого сплава АМг6 после виброиспытаний: слева рабочий слой (общая толщина покрытия 170–200 мкм), справа технологический слой (общая толщина покрытия 260–275 мкм). Увеличение 20х.

Надписи на рисунке: «АМг6» – алюминиевый сплав АМг6,
«МДО» – МДО-покрытие

В результате проведения эксперимента было установлено:

1) Твердое смазочное покрытие на основе дисульфида молибдена типа ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 не выдерживает фреттинг-износа, возникающего в процессе выведения КА РН на целевую орбиту. Поэтому существует опасность схватывания контактирующих поверхностей в процессе длительного нахождения узлов раскрытия в условиях космического пространства.

2) МДО-покрытие, сформированное на поверхности алюминиевого сплава АМгб, также не выдерживает фреттинг-износа, возникающего в процессе выведения КА РН на целевую орбиту. Существует предположение, что в первую очередь это связано с низким пределом текучести алюминиевого сплава АМгб. МДО-покрытие работает как тонкая жесткая мембрана, передающая оказанное на нее усилие на алюминиевую подложку. Подложка в свою очередь деформируется, достигая в определенный момент предела текучести, и уже не восстанавливается в прежний размер. В результате, возвращаясь в исходное состояние МДО-покрытие начинает работать на отрыв от алюминиевой подложки. А сам отрыв приводит к тому, что МДО-покрытие вместо работы на сжатие начинает работать на изгиб, что ведет к его скорому выходу из строя. Также объемная пористость МДО-покрытия (составляет около 15 %) снижает его прочностные свойства.

Предлагаются следующие меры по решению обозначенной проблемы:

- 1) выбрать алюминиевую подложку с большим пределом текучести;
- 2) подобрать такие режимы формирования МДО-покрытия, которые обеспечат наименьшую объемную пористость;
- 3) увеличить радиус сферы упора, чтобы укрупнить площадку контакта и снизить таким образом возникающие в материале площадки напряжения.

Список литературы

[1] *Мезенин Н.А.* Занимательно о железе. – М.: Metallurgy, 1972. – С. 117-119.

[2] *Pattee H.E., Monroe R.E.* Adhesion in the space environment. – Battelle Memorial Institute Columbus Laboratories, 1966. – 137 p.

[3] *Merstallinger A., Sales M., Semerad E., Dunn B.D.* Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum (ESA STM-279 November 2009). – ESA Communication Production Office, 2009. – 57 p.

[4] *Johnson, Michael R.* The Galileo High Gain Antenna Deployment Anomaly. – NASA Jet Propulsion Laboratory, 1994. – 20 p.

[5] *Люшинский А.В.* Диффузионная сварка разнородных материалов. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2006. – 42 с.

[6] *Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л.* Микродуговое оксидирование (обзор) // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23.

Говорун Татьяна Александровна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Glancet@yandex.ru

Шаталов Валерий Константинович – д-р техн. наук, зав. каф. "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru

Штокал Александр Олегович – канд. техн. наук, инженер-конструктор I кат., Филиал ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" г. Калуга. E-mail: cuauthemoc1@yandex.ru

Рыков Евгений Валентинович – начальник сектора, Филиал ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" г.Калуга. E-mail: rik@laspace.ru

Добросовестнов Константин Борисович – начальник сектора, Филиал ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" г. Калуга. E-mail: dkb@laspace.ru

Баженова Ольга Петровна – начальник сектора, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки. E-mail: bazhenova_laspace@mail.ru

Богачев Вячеслав Алексеевич – начальник отдела, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки. E-mail: tribolab@laspace.ru

В.К. Воронин

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Начальный этап вытяжки продолжается от момента касания пуансоном заготовки до момента, когда центры радиусов скругления кромок пуансона и матрицы окажутся в одной плоскости.

Для определения напряженно-деформированного состояния заготовки на начальном этапе механической вытяжки была принята гипотеза, что деталь коробчатой формы можно представить в виде детали, состоящей из четырех элементов цилиндрической формы с плоскими стенками, соединяющими эти элементы.

Для анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрического элемента рассматривались два бесконечно малых участка заготовки, непосредственно примыкающих к опасному сечению BB' (рис 1).

В процессе анализа были приняты следующие допущения:

Металл обладает нормальной анизотропией, то есть коэффициент анизотропии α одинаков в различных направлениях по отношению к направлению прокатки листа;

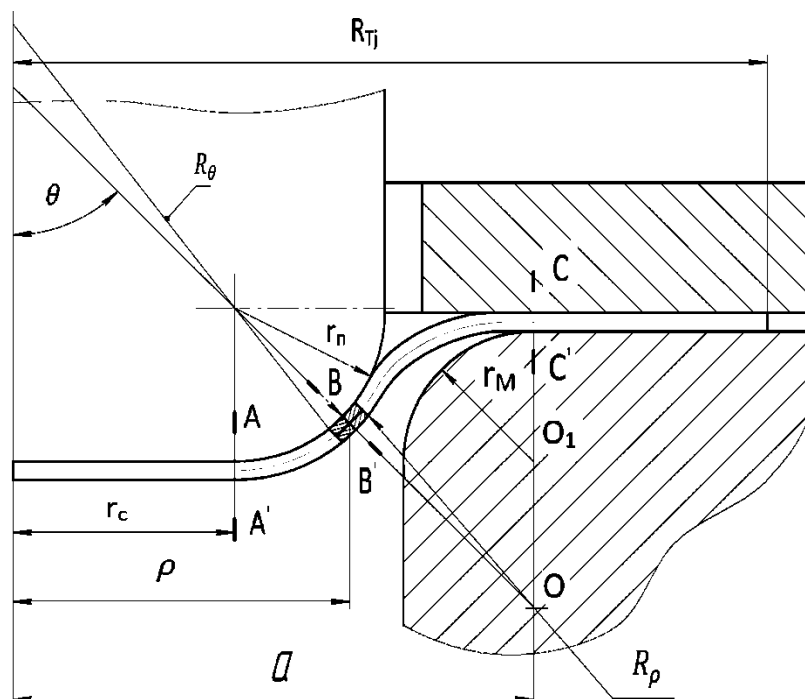


Рис. 1.

Так как процесс деформирования является симметричным, то радиальные, окружные и нормальные к срединной поверхности рассматриваемого элемента заготовки деформации и напряжения являются главными, а приращения главных деформаций и главных напряжений удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\frac{\partial \varepsilon_\rho}{(1+\alpha) \cdot \sigma_\rho \cdot \sigma_\theta} = \frac{\partial \varepsilon_\theta}{(1+\alpha) \cdot \sigma_\theta - \alpha \cdot \sigma_\rho} = \frac{\partial \varepsilon_S}{-(\sigma_\rho + \sigma_\theta)} = \frac{3 \cdot \partial \varepsilon_i}{2(2+\alpha) \cdot \sigma_i} \quad (1)$$

где σ_θ и σ_ρ – главные окружное и радиальное напряжения;

$\partial \varepsilon_\theta$, $\partial \varepsilon_\rho$ и $\partial \varepsilon_S$ – приращения деформаций (окружной, радиальной и толщинной);

$\partial \varepsilon_i$ – приращение интенсивности деформаций;

σ_i – интенсивность напряжения.

Приращение интенсивности деформаций связано с приращениями главных деформаций уравнением:

$$\partial \varepsilon_i = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{2+\alpha}{1+2 \cdot \alpha} \cdot (\partial \varepsilon_\theta^2 + \partial \varepsilon_S \cdot \partial \varepsilon_\theta + \frac{1+\alpha}{2} \cdot \partial \varepsilon_S^2)}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Интенсивность напряжения определяется степенной зависимостью:

$$\sigma_i = C \cdot \varepsilon_i^n, \quad (3)$$

где C и n – коэффициент и показатель упрочнения.

Главные деформации определяются через размеры рассматриваемого элемента заготовки следующим образом:

$$\varepsilon_S = \ln \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{R}{R_0} \quad (5)$$

$$\varepsilon_\rho = \ln \frac{\Delta R'}{\Delta R} \quad (6)$$

где S и S_0 – текущая и исходная толщина выделенного участка элемента заготовки;

R и R_0 – радиусы выделенного участка в процессе деформации;

$\Delta R'$ и ΔR – ширина участка элемента заготовки после деформации и до деформации соответственно.

Для данных выражений справедливо условие постоянства объема, которое имеет вид:

$$\varepsilon_S + \varepsilon_\theta + \varepsilon_\rho = 0 \quad (7)$$

Уравнения равновесия участка, контактирующего с пуансоном, имеют вид:

При проектировании сил на нормаль к срединной поверхности (рис. 2):

$$p \cdot F_3 - 2 \cdot \sigma_\rho \cdot F_1 \cdot \frac{\partial \theta}{2} - 2 \cdot \sigma_\theta \cdot F_2 \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial \varphi}{2} = 0 \quad (8)$$

где p – нормальное давление со стороны пуансона на заготовку.

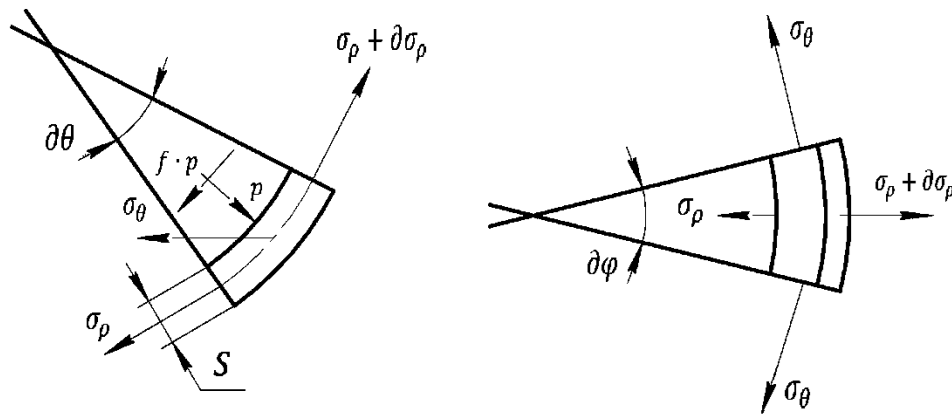


Рис. 2.

При проектировании сил на касательную к срединной поверхности (Рис. 3):

$$\sigma_{\rho} \cdot F_3 + \partial(\sigma_{\rho} \cdot F_1) - \sigma_{\rho} \cdot F_1 - 2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot \cos\theta \cdot F_2 \cdot \frac{\partial\varphi}{2} - f \cdot p \cdot F_3 = 0 \quad (9)$$

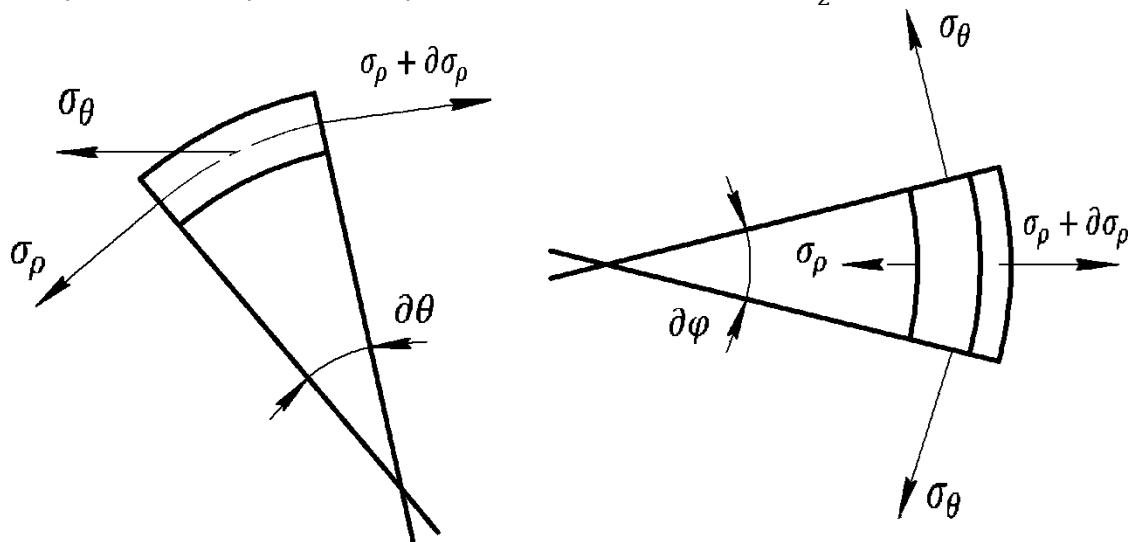


Рис. 3.

Величины площадей определяются следующими соотношениями:

$$F_1 = S \cdot \rho \cdot \partial\varphi \quad (10)$$

$$F_2 = R_{\rho 1} \cdot S \cdot \partial\theta \quad (11)$$

$$F_3 = R_{\rho 1} \cdot \rho \cdot \partial\theta \cdot \partial\varphi \quad (12)$$

где $R_{\rho 1} = r_n + \frac{S}{2}$

После некоторых преобразований уравнений (8) и (9) получим:

$$\partial(S \cdot \rho \cdot \sigma_{\rho}) = \sigma_{\theta} \cdot S \cdot \partial\rho + \frac{f \cdot p \cdot \rho \cdot \partial\rho}{\cos\theta} \quad (13)$$

В процессе вытяжки происходит удлинение элемента заготовки, не контактирующего с пуансоном, необходимо учесть величину удлинения каждого элемента при определении деформированного состояния. Для

определения величины удлинения δ воспользуемся условием постоянства объема, преобразовав его в:

$$\frac{S}{S_0} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \frac{\Delta R'}{\Delta R} = 1 \quad (14)$$

С учетом удлинения данное выражение будет иметь следующий вид:

$$\frac{S}{S_0} \cdot \frac{\rho}{R-\delta} \cdot \frac{R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta}{R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta - \delta} = 1 \quad (15)$$

Решая данное уравнение относительно δ получаем:

$$\delta = 0,5(R + R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta) - \sqrt{0,25(R - R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta)^2 + \rho \cdot R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta \cdot \frac{S}{S_0}} \quad (16)$$

Располагая уравнениями, описывающими изменения размеров заготовки. Радиус ρ , координирующий расположение опасного сечения равен:

$$\rho = r_c + R_{\rho 1} \quad (17)$$

Радиус кривизны срединной поверхности R_θ равен:

$$R_\theta = \frac{\rho}{\sin \theta} \quad (18)$$

Величина R равна:

$$R = r_c + R_{\rho 1} \cdot \Delta \theta - \delta \quad (19)$$

Центр скругления кромки матрицы R_ρ равен:

$$R_\rho = \frac{a-\rho}{\sin \theta} \quad (20)$$

и после некоторых преобразований получаем систему из тринадцати уравнений с тринадцатью неизвестными - $\rho, R, S, \varepsilon_s, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\rho, \varepsilon_i, \sigma_i, \sigma_\rho, \sigma_\theta, p, R_\rho, R_\theta$

Исходя из того, что для решения используются конечные приращения деформаций, сложный процесс нагружения разбиваем на стадии, в которых нагружение считаем простым. Каждая стадия соответствует определенному углу контакта θ_j , где j – номер стадии, который изменяется в пределах $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$. Для решения системы уравнений интервал изменения угла θ на конечное число подинтервалов N . Величина каждого подинтервала $\Delta \theta = \frac{\pi}{2N}$, тогда $\theta_j = j \cdot \Delta \theta$, $j=1, 2, \dots, N$.

На каждой j -ой стадии расчета будем рассматривать элемент, лежащий на участке контакта с пуансоном. Толщина элемента считается постоянной, поэтому для увеличения точности расчетов число отрезков разбиения N должно быть достаточно велико.

Исходя из этого система уравнений имеет вид:

$$\rho_{j+1} = r_c + R_{\rho 1 j+1} \quad (21)$$

$$R_{\theta j+1} = \frac{\rho_{j+1}}{\sin \theta_{j+1}} \quad (22)$$

$$R_{j+1} = r_c + R_{\rho 1 j+1} \cdot \Delta \theta - \delta_{j+1} \quad (23)$$

$$\varepsilon_{S j+1} = \ln \frac{S_{j+1}}{S_0} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{\theta j+1} = \ln \frac{\rho_{j+1}}{R_{j+1}} \quad (25)$$

$$\partial \varepsilon_{S j+1} = \varepsilon_{S j+1} - \varepsilon_{S j} \quad (26)$$

$$\partial_{\theta_{j+1}} = \varepsilon_{\theta_{j+1}} - \varepsilon_{\theta_j}$$

$$\partial \varepsilon_{ij+1} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{2+\alpha}{1+2\alpha} \cdot (\partial \varepsilon_{\theta_{j+1}}^2 + \partial \varepsilon_{S_{j+1}} \cdot \partial \varepsilon_{\theta_{j+1}} + \frac{1+\alpha}{2} \cdot \partial \varepsilon_{S_{j+1}}^2)}^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$\sigma_{ij+1} = C \cdot \varepsilon_{ij+1}^n \quad (28)$$

$$\sigma_{\rho_{j+1}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2+\alpha}{1+2\alpha} \cdot \frac{\sigma_{ij+1}}{\partial \varepsilon_{ij+1}} \cdot [-\partial \varepsilon_{\theta_{j+1}} - (1+\alpha) \cdot \partial \varepsilon_{S_{j+1}}] \quad (29)$$

$$\sigma_{\theta_{j+1}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2+\alpha}{1+2\alpha} \cdot \frac{\sigma_{ij+1}}{\partial \varepsilon_{ij+1}} \cdot (\partial \varepsilon_{\theta_{j+1}} - \alpha \cdot \partial \varepsilon_{S_{j+1}}) \quad (30)$$

$$R_{\rho_{j+1}} = \frac{a-\rho_{j+1}}{\sin \theta_{j+1}} \quad (31)$$

$$(S \cdot \rho \cdot \sigma_{\rho})_j + 0,5 \cdot (\rho_{j+1} - \rho_j) \cdot [\sigma_{\theta_{j+1}} \cdot S_{j+1} + \sigma_{\theta_j} \cdot S_j + \frac{f \cdot \rho_{j+1} \cdot S_{j+1}}{\cos \theta_{j+1}} \times$$

$$\times \left(\frac{\sigma_{\theta_{j+1}}}{R_{\theta_{j+1}}} + \frac{\sigma_{\rho_{j+1}}}{R_{\rho_{1j+1}}} \right) + \frac{f \cdot \rho_j \cdot S_j}{\cos \theta_j} \cdot \left(\frac{\sigma_{\theta_j}}{R_{\theta_j}} + \frac{\sigma_{\rho_j}}{R_{\rho_{1j}}} \right)] =$$

$$= \sigma_{\rho_j} \cdot \rho_j \cdot S_j + 0,5 \cdot (\rho_{j+1} - \rho_j) \cdot B \quad (32)$$

$$V = \sigma_{\rho_{j+1}} \cdot \rho_{j+1} \cdot S_{j+1} \quad (33)$$

Для контроля правильности расчетов используется неравенство:

$$\left| \frac{U-V}{V} \right| \leq \Delta_1, \quad (34)$$

где U – левая часть уравнения (32);

Δ_1 – заданная точность

Если неравенство не выполняется, то осуществляется корректировка толщины, а также и проведенных расчетов.

Таким образом получается математическая модель процесса деформирования одного из четырех цилиндрических элементов заготовки на начальном этапе механической вытяжки детали коробчатой формы. Для проведения дальнейших расчетов необходимо ввести коэффициент, учитывающий напряженно-деформированное состояние стенок заготовки, который находится экспериментальным путем.

Список литературы

- [1] Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
- [2] Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
- [3] Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Под общ. Ред. А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.
- [4] Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

Воронин Виктор Константинович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: v-a-r-o-n-a@mail.ru

В.О. Попов, И.А. Филиппова

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ И ЛЕДЯНЫХ МОДЕЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Переход на цифровое описание изделий – CAD, и появившиеся затем аддитивные технологии произвели настоящую революцию в литейном производстве, что особенно проявилось в высокотехнологичных отраслях – авиационной, аэрокосмической, атомной, медицине и приборостроении – тех отраслях, где характерно малосерийное, зачастую, штучное производство. Именно здесь уход от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей технологиями послойного синтеза радикально сократило время создания новой продукции.

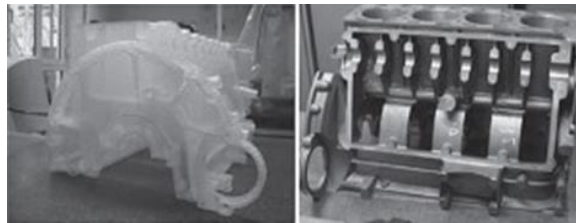


Рис.1. Первый опытный образец блока цилиндров, изготовленный с применением синтезированной модели (традиционными методами требуется ≥ 6 мес., причем, основное время уходит на создание оснастки)

Синтез-модели из фотополимеров. Суть технологии – в использовании специальных светочувствительных смол, которые отверждаются избирательно и послойно в точках или местах, куда по заданной программе подводится луч света. Способы засветки слоя различны (лазер, ультрафиолетовая лампа, видимый свет). Существуют две основные технологии создания моделей из фотополимерных композиций: лазерная стереолитография, SLA-технология (Stereolithography Laser Apparatus) и технология SLS (Selective Laser Sintering) – лазерное спекание порошковых материалов с отверждением слоя фотополимера вспышкой ультрафиолетовой лампы или прожектора. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. По 2-му способу отверждение всего слоя происходит сразу же после или в процессе его формирования за счет излучения от управляемого источника света – видимого или ультрафиолетового. Различие в способах формирования слоев обуславливает и различие в скоростях построения модели. Очевидно, что скорость выращивания 2-м способом выше. Однако стереолитография была и остается самой точной технологией и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели – основные и определяющие. Таким образом,

оптимальный выбор технологии получения моделей и, следовательно, прототипирующего оборудования зачастую не является очевидным и должен проводиться с учетом конкретных производственных условий и реальных требований к моделям. Стереолитография широко применяется для: выращивания литейных моделей; изготовления мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол); создания дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов; изготовления полноразмерных и масштабных моделей для гидродинамических, аэродинамических, прочностных и других видов исследований.

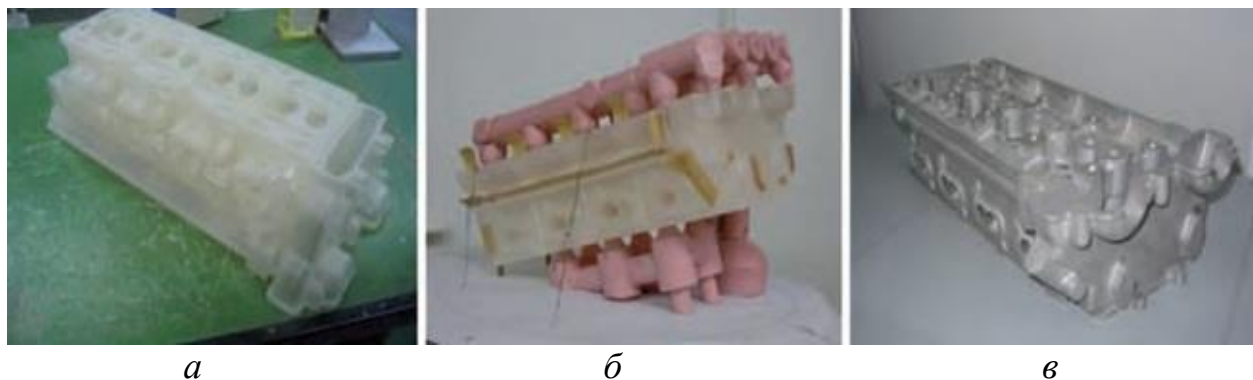


Рис. 7. Quick-cast-модель (а), она же с литниковой системой (б) и отливка АІ-головки цилиндров (в)

Для целей литейного производства применяют т. н. Quick-Cast-модели, то есть модели для «быстрого литья». Так называют модели, по которым, по аналогии с восковыми моделями, можно быстро получить металлические отливки. Но модели Quick-Cast имеют сотовую структуру массива стенок. Внешние и внутренние поверхности стенок выполняют сплошными, а саму стенку формируют в виде набора сот, что имеет большие преимущества: существенно, на 70% снижается общая масса модели, а, следовательно, меньше материала нужно будет выжигать. В процессе выжигания любой модельный материал расширяется и давит на стенки формы, при этом, форма с тонкостенными элементами может быть разрушена, сотовая же структура позволяет модели при расширении «складываться» внутрь, не напрягая и не деформируя стенки формы.



Рис. 2. САD-модель (а), SLS-модель (б) и отливка передняя крышка ДВО, полученная в ПФ (в)

В отдельных случаях SLA-модели, так же, как и SLS-модели, могут быть использованы не как литейные модели, а в качестве оснастки для получения модели при литье в песчаную форму (ПФ) – рис. 8. Однако этот способ используют редко из-за недостаточной прочности SLA-модели. В России имеется достаточно большой опыт применения технологии Quick-Cast в авиационной промышленности (предприятия «Салют», «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы»), в энергетическом машиностроении («ТМЗ» – Тушинский машиностроительный завод), некоторый опыт имеется и в автомобильных НИИ. Так, в НАМИ по этой технологии впервые в России были получены такие сложные отливки, как головка и блок цилиндров.



Рис. 3. SLA-модель (а) и отливка рабочее колесо турбоагрегата (б), оболочковая форма и отливка рабочее колесо турбины ОАО «ТМЗ» (в)

Основной производитель SLA-машин – американская компания 3D Systems, которая выпускает широкую гамму машин с разными размерами зоны построения.

Особое внимание хотелось бы обратить на ОАО «Тушинский машиностроительный завод», где впервые в мировой практике решена задача получения качественных отливок типа «Рабочее колесо» гидротурбины массой до 5 тонн, получаемых методом ЛВМ (литьем по выплавляемым моделям). Технологический процесс получения отливок (рабочее колесо) состоит из нескольких этапов, началом которых служит построение 3D – модели будущей отливки с элементами конструкции ЛПС в программном обеспечении LVMFlow для моделирования оптимальных режимов нагрева

формы под заливку, скоростей заливки и формирования литейных дефектов. Изготовление модельного комплекта выполняется на установке быстрого прототипирования (VIPER PRO, США). Изготовленная из сегментов 3D модель выполняется по SLA- технологии. Разработанный технологический процесс получения отливок типа «Рабочее колесо» методом ЛВМ позволил получить качественные изделия весом до 5 тонн, по своим техническим характеристикам превышаемые сварные в 2.5 раза, при этом процесс моделирования отливки и поиск оптимальных технологических параметров в программе LVMFlow составил 40 часов.

Другим, принципиально новым подходом, является метод по выплавляемым ледяным моделям.

На сегодняшний день, по степени ущерба, наносимого окружающей среде, литейно-металлургический комплекс занимает второе место среди отраслей промышленности после топливно-энергетического комплекса. Нет сомнений, что охрана окружающей среды, предупреждение нарушения экологического равновесия путем рационального природопользования являются важными факторами развития литейного производства. При этом решающая роль отводится малоотходным и безотходным технологиям, обеспечивающим охрану природы на более высоком качественном уровне.

Криотехнология получения отливок в песчаных формах является одним из направлений инновационного процесса в литейном производстве. Привлечение криотехнологии в формовочные процессы, в частности для получения песчаных форм по разовым ледяным моделям, вызвано возможностью минимизации применения неорганических материалов (в том числе связующих) путем получения оболочковых форм. Применение при этом агрегатных переходов воды (из жидкого в твердое при замораживании модели, опять в жидкое – таяние модели при освобождении полости формы, а затем испарение при сушке увлажненной формы) в какой-то мере подобно кругообороту воды в природе. Эта вода для ледяных моделей на 30-90% и сухой песок формы на 80-90% (за вычетом песка, участвующего в образовании оболочки путем пропитки – увлажнения) могут использоваться многократно. Разработка технологии получения песчаной формы по ледяной модели ведется в таком направлении, что для формовки применяют сухой несвязанный песок аналогично вакуумно-пленочной формовке (ВПФ, V-process). Это обосновано прежде всего экологическими причинами, поскольку традиционно наличие связующего в отработанном удаляемом в отвал песке и термодеструкция этого связующего с выделением газов дают основные загрязнения. Кроме того, наличие связующего повышает стоимость формы, усложняет уплотнение формовочного материала и его регенерацию.

Развивается также направление получения оболочковых форм пропиткой сухого формовочного материала с применением быстротвердеющих связующих составов. Это направление началось с введения в формовочный песок материала, который твердеет при взаимодействии с талой водой от моде-

ли и создает прочную корку, например, полуводного гипса или цемента. Однако указанные материалы имеют весьма ограниченное применение при изготовлении форм. Гипсовые смеси обладают низкой огнеупорностью и газопроницаемостью, а обе смеси, особенно цементные, большой длительностью твердения, что затрудняет их применение для литья по ледяным моделям. Обе смеси трудно регенерировать. В качестве связующего можно использовать жидкое стекло (содовое), лигносульфонаты (побочный продукт при производстве целлюлозы), синтетические смолы с отвердителем (кислота). Такие смеси наиболее дорогостоящие. Для литья по ледяным моделям весьма перспективны водорастворимые фенолоформальдегидные смолы, к примеру СФЖ-30-13 и водоэмульсионная смола СФЖ-301.

Описанные концепции технологии литья по ледяным моделям относят ее к наукоемким высоким криотехнологиям литейного производства.

Список литературы

[1] Зленко М.А., Забеднов П.В. *Металлургия машиностроения* - 2013г. №2, *Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Часть I. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм* <http://www.normacs.info/articles/326>

[2] Дорошенко В.С. Что может быть экологичнее воды? Криотехнология получения металлических отливок по ледяным моделям / В. С. Дорошенко // *Литье и металлургия: научно-производственный журнал*. – 2012. – № 2 (65). – С. 45 - 48. <http://rep.bntu.by/handle/data/8063>

[3] Ткаченко С.С., Кривицкий В.С. Направления модернизации литейного производства региона. (*Литейщик России*. 2011.№9 с.27-32).

Попов Вячеслав Олегович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sava0903@yandex.ru

Филиппова Инна Аркадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katran-ogmet-04@yandex.ru

Д.А. Седов, И.А. Филиппова

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЛИТЬЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) – это способ получения фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме – кристаллизаторе, основанный на применении электрошлакового переплава расходуемого электрода. Отливку получают переплавом электродов из металла требуемого химического состава. Источником теплоты при ЭШЛ является шлаковая ванна, нагреваемая проходящим через нее электрическим током (рис. 1).

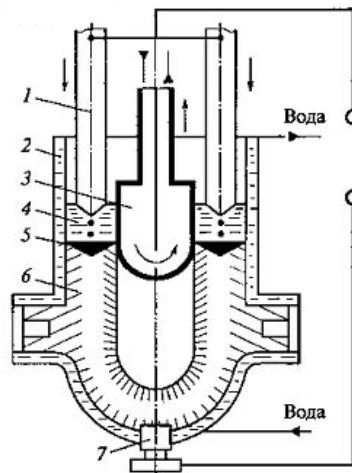


Рис. 1. Схема получения отливки электрошлаковым литьем: 1 – электроды (стрелками показано направление их движения); 2 – кристаллизатор; 3 – стержень (наружной стрелкой показано направление его движения вверх; фигурной стрелкой – направление потока охлаждающей воды); 4 – шлаковая ванна; 5 – расплав; 6 – отливка; 7 – затравка

К ЭШЛ следует отнести три основных способа. ЭШЛ в водоохлаждаемый кристаллизатор, электрошлаковая тигельная плавка с последующей разливкой металла во вращающийся кокиль (электрошлаковое центробежное литье - ЭШЦЛ) и заливкой металла в стационарный кокиль (электрошлаковое кокильное литье - ЭШКЛ).

Суть процесса электрошлакового литья заключается в том, что приготовление расплава (плавка) совмещено по месту и времени с заполнением литейной формы. Поэтому при ЭШЛ отпадает необходимость в плавильных печах, приготовлении формовочных и стержневых смесей, формовке, литниковых системах и прибылях. Отливки характеризуются высокими служебными характеристиками на уровне кованных, при этом коэффициент использования металла составляет 0,8 (высокий в сравнении с другими

технологиями (0,5 – 0,7)). Вместе с тем для изготовления отливки требуется достаточно сложная и дорогостоящая литейная форма, специальные заготовки – электроды из проката или полученные предварительно литьем.

Электрошлаковое литье постоянно расширяет области своего применения.

Оригинальный способ восстановления зуба экскаватора на установке электрошлакового кокильного литья с источником питания 120 кВт предложили специалисты предприятия ООО «ТехноЭКЛ» (г.Калуга). Суть технологии восстановления заключается в том, что изношенная часть подрезается для создания плоскости кислородно-пропановым резаком, наконечник отливается на установке ЭКЛ, а затем на этой же установке приваривается электрошлаковой сваркой к оставшейся части зуба отлитый наконечник. Более подробное описание технологии следует далее.

На рис.1 показан общий вид зуба с изношенной рабочей частью.

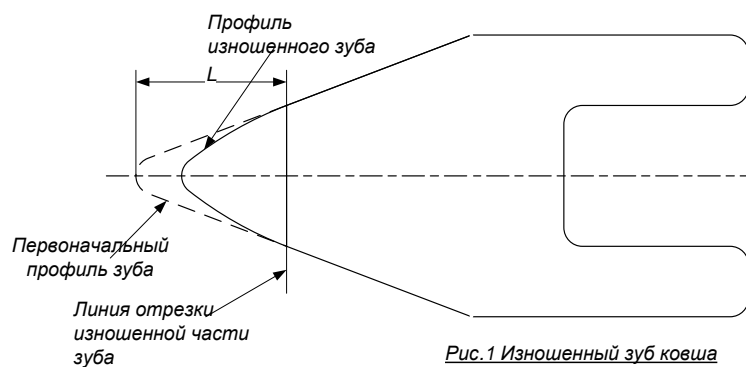


Рис.1 Изношенный зуб ковша

После отрезки изношенной части зуба последняя может быть использована в качестве элемента расходуемого электрода. Для изготовления расходуемых электродов может быть использованы любые изношенные детали из стали 110Г13, в частности трака гусениц, лемеха плугов, броневые листы дробилок и т.д.

Рабочая часть зуба массой 30÷35 кг в зависимости от длины изношенной части L (рис.1) отливается в кокиль на установке ЭКЛ, конструкция его показана на рис. 2.

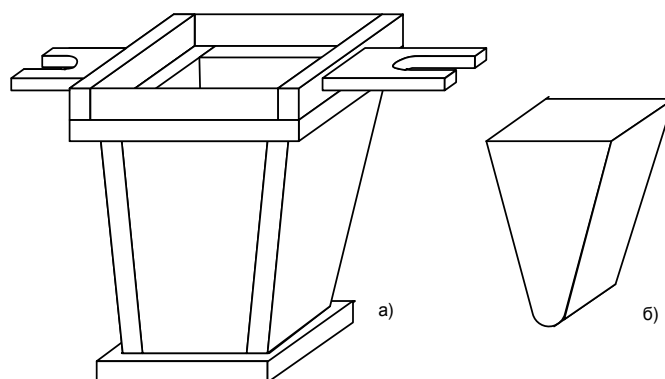


Рис.2 а) кокиль для рабочей части; б) отливка рабочей части

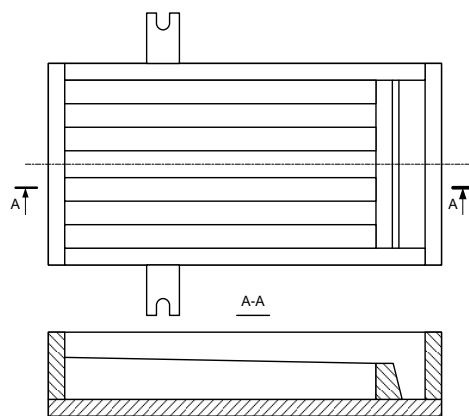


Рис.3

Дополнительно с отливками рабочей части зубьев на установке ЭКЛ отливаются расходуемые электроды, представляющие из себя прутки сечением 25x25 длиной 400 мм. Конструкция кокиля показана на рис.3.

Приспособление для сварки (рис. 4) состоит из стола 1 верхняя плита которого подключена к источнику питания установки ЭКЛ. На плиту 1 устанавливается зуб 2 и его рабочая часть 3 с зазором между собой 40÷50 мм. С боку к ним прикладываются водоохлаждаемые плиты. Зазоры между частями зуба и плитами заделываются огнеупорной массой. Расходуемый электрод закрепляется в инверторной головке 5 и представляет собой набор электродов, отлитых в кокиле. Их вес должен быть больше, чем предполагаемая масса зазора между рабочей частью зуба и его основанием.

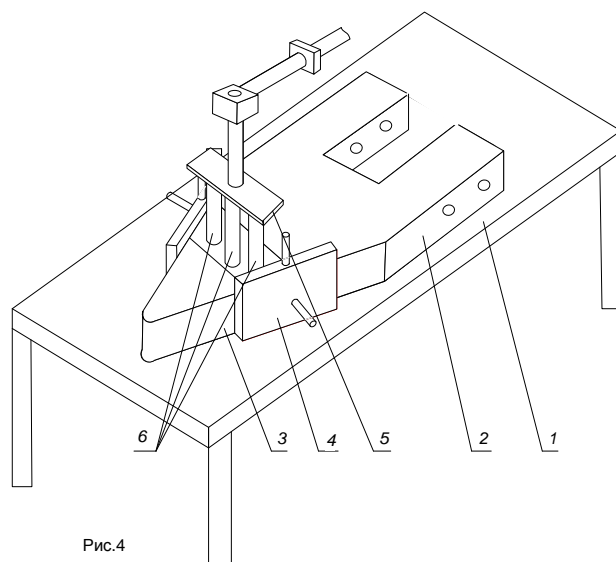


Рис.4

Как показали исследования, благодаря быстро протекающему процессу электрошлаковой сварки (5÷8 мин), твердость рабочей части зуба не уменьшается, а глубина проплавления составляет 15÷20 мм.

Одним из направлений электрошлакового кокильного литья является переработка алюминиевой стружки, облоя отливок и т.д. Выгодного при

электрошлаковой переплавке стружки составляет не менее 90%. Однако технология ее переработки имеет свои особенности. Прежде всего, тигель для переплава алюминиевой стружки имеет гораздо большие размеры, чем для стали и медных сплавов. Конструкция тигля приведена на рис. 5.

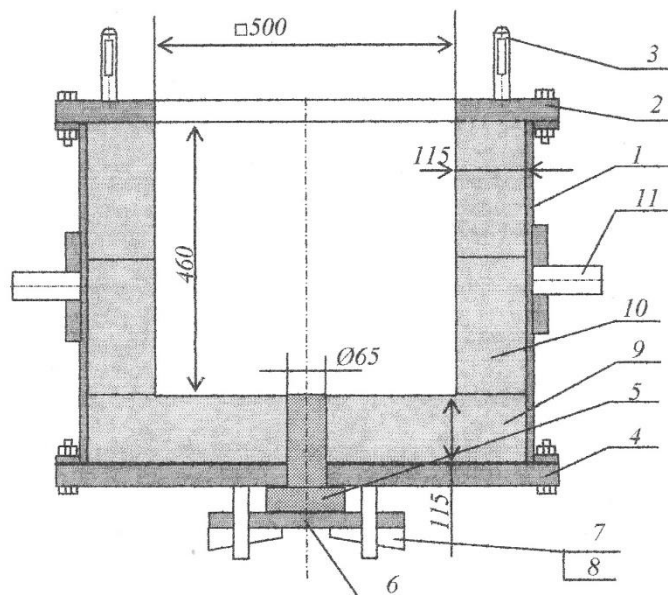


Рис. 5.

Корпус тигля 1 выполнен из стального листа толщиной 10 мм. Сверху к нему болтами крепится крышка 2 с колонками 3, а снизу дно 4 изолируется от корпуса асбестом толщиной 5 мм. Крышка и дно тигля изготавливается из листовой стали толщиной 20-30 мм. В дно встраивается подовый электрод 5, выполненный из графита, который фиксируется металлической планкой 6 посредством клинов 7 в колонках 8. Футеровка тигля выполняется из магнезитового или муллитокорундового кирпича, может использоваться и шамотный кирпич, однако в этом случае стойкость футеровки будет невысока. Тигель в сборе подвешивается на стойку на осях 11.

Плавку ведут с помощью не расходуемого графитового электрода диаметром не более 120 мм. В качестве флюса используется флюс, состоящий на 40% из NaCl, 40% KCl и 20% Na₃AlF₆ – криолита.

Стружка вводится в тигель достаточно быстро, слоями. Последующий слой вводится только после полного растворения предыдущего до образования чистого зеркала шлака. Количество вводимой стружки определяется визуально и заканчивается на уровне 20-30 мм до верхней крышки, после чего производится слив жидкого алюминия. В час можно переплавить 70 - 80 кг алюминиевой стружки.

На рис. 6 показана схема слива расплава, на которой тигель 1 занимает положение к готовности выпуска алюминия, где 2 - крышка тигля, 3 - клины, 4 - летка для слива жидкого алюминия, которая приварена к крышке для отсечки шлака, 5 - деревянная пробка, забитая в отверстие для выпуска

металла. Опытным путем установлено, что наиболее оптимальным диаметром является отверстие 20 мм. После извлечения пробки чистый металл сливается либо в отдельный ковш для заливки готовых форм, либо в изложницы для получения алюминиевых стандартных чушек. Моментом окончания заливки служит появление в серебристом потоке сливаемого металла хорошо различимых красных вкраплений шлаковых включений.

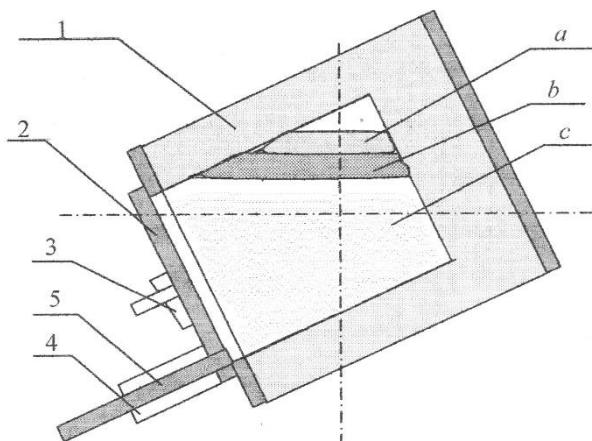


Рис. 6.

Следует отметить, что после установки тигля в положение для слива в нем образуется три зоны (рис. 6): а – шлак, б – шлак с окислами алюминия, с – чистый алюминий. После окончания слива чистого алюминия, тигель быстро возвращается в исходное положение, крышка снимается, вводится графитовый электрод в неслившийся шлак и продолжается накопление очередной порции жидкого алюминия.

Список литературы

[1] Литвиненко С.Н., Косинов С.Н. - Соединение электрошлаковой сваркой литых и кованных заготовок для крупных деталей. *Металлургия машиностроения* - 2010г.

[2] С.Д.Ранич, И.А.Филиппова, В.Е. Хайченко – Переплав отходов алюминия методом электрошлакового кокильного литья на установках типа УФЭЛ-100 // *М: Литейщик России*, 2016, № 10, с. 34-36.

[3] С.Д.Ранич, В.Е. Хайченко, И.А.Филиппова – Способ восстановления зубьев ковшей десятикубовых экскаваторов // *М: Литейщик России*, 2016, № 12, с. 29-30.

[4] Иванов В.Н. Специальные виды литья: Учебное пособие/ Под ред. В.С. Шуляка. – М.: МГИУ, 2007. - 316 с.

[5] Электронный ресурс: www.autowelding.ru

Седов Даниил Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: danil.sidor972021@gmail.com

Филиппова Инна Аркадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katran-ogmet-04@yandex.ru

А.Б. Мкртчян

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНОК ВЕЛИЧИНЫ БОЧКООБРАЗНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Холодная объемная штамповка (ХОШ) – один из наиболее эффективных и ресурсосберегающих способов изготовления заготовок, высокая точность которых (8...9 качества) позволяет не только свести к минимуму последующую механическую обработку, но и в ряде случаев полностью исключить ее. Такая точность размеров обеспечивает высокий коэффициент использования материала, который достигает 85...95% [1].

Для осуществления основных формоизменяющих операций ХОШ, выполняемых на прессах, используют штучные заготовки. Большое распространение в промышленности получили комбинированные процессы получения таких заготовок, когда предварительно их отрезают заведомо большей длины и меньшего диаметра (например, на ленточнопильном станке), а для получения необходимого размера их подвергают осадке [2].

В зависимости от характера решаемых технологических задач к погрешностям формы и точности размеров осажённых поковок предъявляют различные требования. Одним из таких показателей формоизменения осажённой поковки является бочкообразность ее боковой поверхности, возникающая вследствие действия сил трения на торцевых поверхностях заготовки во время ее деформирования. Трение играет решающую роль в образовании бочкообразности, а степень деформации и относительная высота заготовок, в той или иной мере, влияют также на ее величину.

Указанное явление на теоретическом и экспериментальном уровнях наиболее широко исследовано для условий горячей деформации. В частности, Я.М. Охрименко в своих исследованиях установил, что у высоких образцов $\left(\frac{d}{h} \leq 0,5\right)$ максимум бочкообразности наблюдается при большой степени деформации ($\varepsilon = 0,55$), а у относительно низких $\left(\frac{d}{h} \leq 4,0\right)$ – при малой ($\varepsilon = 0,25$) [3].

Величина относительной бочкообразности рассчитывается, как разность между объемом исходной заготовки (1) и объемом цилиндра диаметром $D_{нок}$ и высотой $H_{нок}$ [4].

$$V_{исх.} = \frac{\pi D_{исх.}^2}{4} \cdot H_{исх.} \quad (1)$$

$$V_{\text{цил.}} = \frac{\pi D_{\text{пок.}}^2}{4} \cdot H_{\text{пок.}} \cdot \quad (2)$$

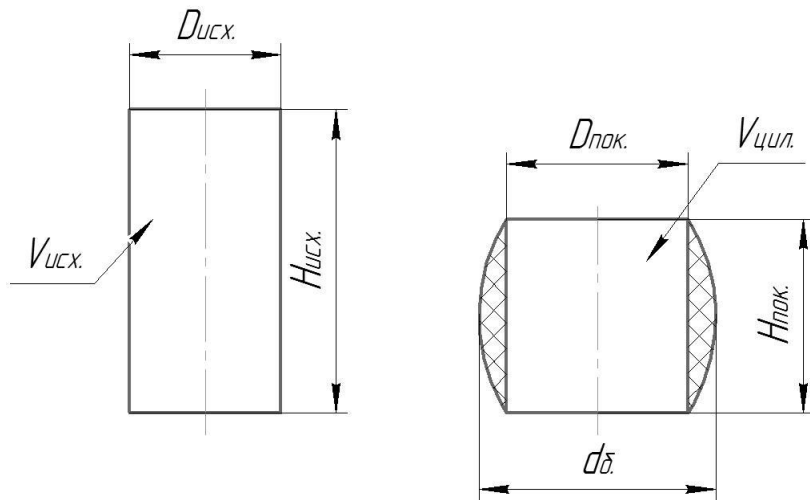


Рис. 1. Заготовка до и после осадки

Тогда относительная величина объема, затрачиваемая на бочкообразность, определяется по формуле:

$$\theta = \frac{V_{\text{исх.}} - V_{\text{цил.}}}{V_{\text{исх.}}} \cdot (100\%) = 1 - \frac{V_{\text{цил.}}}{V_{\text{исх.}}} \quad (3)$$

Данный показатель является относительным и выражает объемную характеристику формоизменения. Размерный показатель не так важен при горячей осадке, т.к. бочкообразность устраняется дополнительной операцией – обкаткой вдоль оси заготовки, однако при холодной осадке обкатка невозможна.

Одним из особенностей технологии ХОШ проявляется в том, что оценку формоизменения осажённых заготовок оценивают не объемными показателями, а размерами: высотой и максимальным диаметром осажённой заготовки- $d_{\text{б.}}$. Точность указанного размера зависит от специфики последующей операции. Например, при выполнении операций холодного обратного выдавливания поковок типа стакан, односторонний зазор между исходной заготовкой и матрицей не должен превышать 0,2...0,5 мм, при диаметре до 84мм. При прямом выдавливании предъявляются менее жесткие требования, зазор до 1,5...2мм. В описанных случаях объемный показатель бочкообразности не дает полной картины о размерах заготовки.

На необходимость оценки бочкообразности с привлечением диаметральных размеров указал в своей работе А.Л. Воронцов [4].

Такого же мнения придерживаются и другие исследователи [5, 6].

Исходя из вышеперечисленных требований, была предложена новая методика расчета величины бочкообразности, с учетом размера $d_{\text{б.}}$.

$$\delta d_{\text{б.}} = \frac{d_{\text{б.}} - D_{\text{пок.}}}{d_{\text{б.}}} \cdot (100\%) = 1 - \frac{D_{\text{пок.}}}{d_{\text{б.}}} \cdot (100\%), \quad (5)$$

Для изучения явления бочкообразности в условиях холодной деформации в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана был выполнен комплекс однофакторных и многофакторных экспериментов по осадке цилиндрических медных заготовок из на гидравлическом прессе.

В ходе проведения эксперимента, осаживали заготовки из отожженной меди марки М1 с размерами $\text{Ø}20 \times 20 \text{ мм}$ ($d/h=1,0$) с применением смазочного материала ($\mu=0,1$) и без него ($\mu=0,3$). В качестве смазки использовали животный жир. Осадку выполняли на гидравлическом прессе модели П481А с номинальной силой $P=400 \text{ кН}$.

Вывод: на основе результатов выполненных экспериментов, установлена адекватность предложенного показателя величины бочкообразности (δd_o), а также установлена практическая целесообразность его применения, при расчетах величины бочкообразности при холодной осадке цилиндрических исходных заготовок.

Список литературы

[1] Навроцкий Г.А. Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.

[2] Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Высшая школа, 1987. – 144 с.

[3] Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: Учебник для вузов. – 2-е изд., пер. и доп.– М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

[4] Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие: в 2т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

[5] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В, Мкртчян А.Б. Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке // Фундаментальные исследования 2016. - № 8-1 .- С. 9 – 13.

[6] R. Raja, S. Lakshminarasimhan, P. Murugesan. Investigation of Barrelling Radius and Top Surface Area for Cold Upsetting Of aluminum Specimens // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2013. Т. 3. – № 6. – P. 3852-3862.

Мкртчян Арман Бениаминович – студент КФ МГТУ им Н.Э. Баумана. E-mail: armanmkrтчyan95@mail.ru

А.А. Сухарева

ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Основным недостатком традиционных способов получения отверстий является необходимость приобретать инструменты широкой номенклатуры. Требуется наличие мерных сверл, зенкеров, разверток. И чем шире номенклатура производства, тем больше затраты на приобретение инструмента. Современное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащенное устройством управления с винтовым интерполятором, позволяет в большинстве случаев получать неглубокие отверстия (до трех диаметров) фрезерованием. Такой способ имеет ряд преимуществ. Во-первых, отказ от сверлильных операций позволит сократить дорогостоящие производственные площади выведением из основного производства сверлильных станков. Во-вторых, значительно сократить количество инструментов. В-третьих, повысить производительность и сократить основное время обработки.

Данный способ обработки универсален, позволяет получать отверстия различных диаметров, ступенчатые отверстия и в некоторых случаях может заменить растачивание.

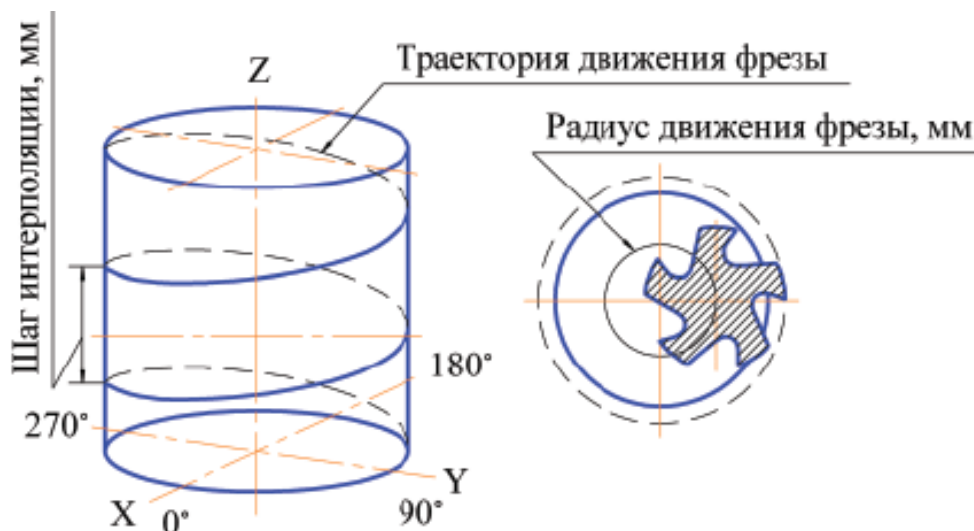


Рис. 1. Циклограмма винтовой интерполяции [1]

Для реализации фрезерования отверстий винтовой интерполяцией, ряд инструментальных фирм разработали специальные концевые фрезы, с увеличенной радиальной жесткостью. Например, серия фрез фирмы DIJET (Япония), специально разработанная для обработки алюминия, позволяющая при наличии данной функции в системе управления станка произво-

дуть фрезерование отверстий глубиной до 3-х диаметров в диапазоне от 5 до 32 мм. На рисунке 1, представлена циклограмма траектории движения фрезы при винтовой интерполяции.

Характерная геометрия и форма заточки режущей части фрезы гарантирует высокую прочность режущих кромок и эффективный отвод стружки из зоны резания. Специально разработанный твердый сплав JC20015 DLS в сочетании с алмазным износостойким покрытием существенно увеличивает производительность и стойкость инструмента, а также уменьшает возможность образования нароста на режущих кромках в процессе работы фрезы [1]. Такие фрезы получили название спиральные концевые. Пример спиральной концевой фрезы представлен на рисунке 2.

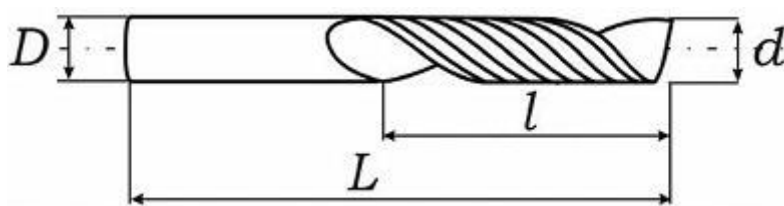


Рис. 2. Конструкция спиральной концевой фрезы

Спиральные концевые фрезы применяются при обработке термостойких материалов, а также при обработке легких сплавов металлов. За счет своей формы спиральные фрезы используются для получения отверстий с высокими требованиями к погрешности формы. Такие фрезы должны работать на повышенных скоростях резания, что дополнительно обеспечивает высокую чистоту поверхности.

Список литературы

[1] Общество с Ограниченной Ответственностью ТД «СТ Групп»: [сайт]. URL: <http://www.s-t-group.com/useful/12.2008.php> (дата обращения: 27.03.2017).

Сухарева Александра Алексеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alexandra.sukhareva17@gmail.com

Б.Н. Агеев

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Пространственную форму детали определяет сочетание различных поверхностей. Для обеспечения обработки конструктор стремится использовать простые геометрические поверхности: плоские, круговые цилиндрические и конические, шаровые, торовые, гипоидные. Геометрическая поверхность представляет собой совокупность последовательных положений (следов) одной производящей, линии, называемой направляющей, расположенных на другой линии, определяющей поверхность, называемой образующей. Линии образующая и направляющая вполне могут быть заменены одна на другую [1]. Также любая поверхность может быть задана и другой линией (например, архимедовой спиралью задана плоскость), определяющей существования выше указанных двух.

При обработке поверхностей на металлорежущих станках образующие и направляющие, линии в большинстве случаев отсутствуют. Они воспроизводятся комбинацией движений заготовки и инструмента, скорости которых согласованы между собой. Движения резания являются формообразующими.

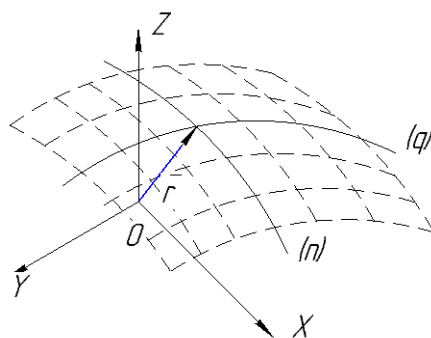


Рис. 1.

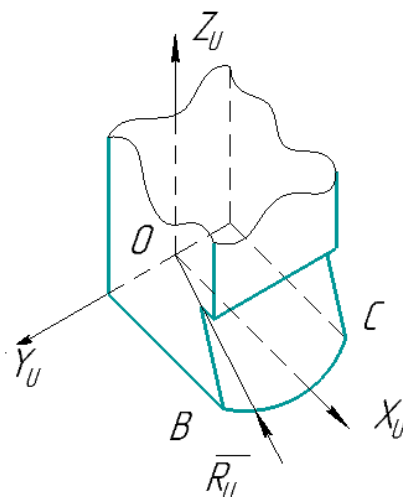


Рис. 2.

Закон любого движения инструмента относительно детали определяется видом зависимости величин $I_x, I_y, I_z, f_{xu}(i), f_{yu}(i), f_{zu}(i)$ от параметра движения, если параметром движения является, то при движении инструмента имеют место зависимости:

$$\begin{cases} I_x = f_x(i), \varphi_{xu} = F_x(i), \\ I_y = f_y(i), \varphi_{yu} = F_y(i), \\ I_z = f_z(i), \varphi_{zu} = F_z(i), \end{cases}$$

Инструмент в процессе обработки детали содержит несколько движений и каждое из них имеет свое конкретное назначение.

Срезание припуска с номинальной поверхности детали осуществляется слоями. Движения инструмента, при котором одна режущая кромка срезают один слой - называют движением резания или главным движением. Движение резания, где каждая последующая поверхность смещена относительно предыдущей, называется подачей. При выборе закона формирующих движений инструмента стремятся к тому, чтобы эти движения были наиболее простыми [2]. Простые, легко осуществимые станком движения состоят из элементарных - прямолинейных и вращательных. Поэтому можно составить возможные принципиальные кинематические схемы, основанные на сочетании таких элементарных движений.

Сущность того или другого метода обработки определяется соотношением скоростей, осуществляемых при движении, и не зависит от того сообщается ли им движение резания и подачи инструмента или детали. Движение подачи может совершить как инструмент, так и деталь. Для срезания припуска и формообразования поверхности детали инструмент должен совершать движения резания и подачи. Однако при обработке детали кроме этих движений инструмент осуществляет дополнительно несколько так называемых транспортных движений: подход к детали и отход от нее; холостые, обратные движения; переход от одной элементарной поверхности к другой и т.д. Эти последние не влияют на условия срезания припуска и формообразования детали, но влияют на производительность операций.

Список литературы

[1] Решетов Д.Н., Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986 г.

[2] Косилова А. Г., Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976 г.

Агеев Борис Николаевич – студент КФ МГТУ им Н.Э. Баумана.
E-mail: ageevboris58@gmail.com

И.В. Кузнецов, Д.А. Барина

ОЦЕНКА БОЧКООБРАЗНОСТИ ПОКОВОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для осуществления основных формоизменяющих операций холодной объемной штамповки, выполняемой на прессах, используют штучные заготовки. Большое распространение в промышленности получили комбинированные процессы получения таких заготовок, когда предварительно их отрезают заведомо большей длины и меньшего диаметра (например, на ленточнопильном станке), а для получения необходимого размера их подвергают осадке [2].

Комбинированные процессы, по сравнению с другими способами получения штучных заготовок, обладают значительными преимуществами: во-первых, сокращается количество отходов металла в стружку, т.к. ширина реза соответствует толщине пилы ленточнопильного станка (0,65...0,9мм); во-вторых, увеличивается производительность отрезки заготовки, вследствие чего уменьшается время, что является одним из важных направлений развития современного производства.

Наличие сил трения на торцевых поверхностях заготовки во время ее осадки приводит к тому, что цилиндрическая поверхность приобретает бочкообразную форму, вследствие неравномерности величины деформации по высоте поковки.

Изучение формы боковой поверхности осажённых поволоков является одним из направлений исследований процесса осадки.

В частности, А.Л. Воронцов в своих исследованиях для характеристики выпуклости боковой поверхности предложил использовать разность наибольшего (d_b) и наименьшего (d_0) диаметра осажённой поковки. Для описания формы «бочки» им предложена зависимость для определения $3x$ диаметров сечений, нормальных к оси поковки [1].

Среди зарубежных авторов, занимавшихся исследованием явления бочкообразования, следует отметить работу, в которой автор исследовал форму выпуклости боковой поверхности на основе проведенных им экспериментов, а также аппроксимировал форму боковой поверхности дугами окружности с учетом коэффициента контактного трения, относительной высоты и степени деформации исходных заготовок [4].

В работе [3] автором предложена зависимость для определения радиуса дуги боковой поверхности осажённой поковки:

$$R = \frac{h^2 + (d_b - d_1)^2}{4(d_b - d_1)}, \quad (1)$$

где h – высота осажённой заготовки; d_b – наибольший диаметр осажённой поковки; d_l – наименьший диаметр осажённой поковки.

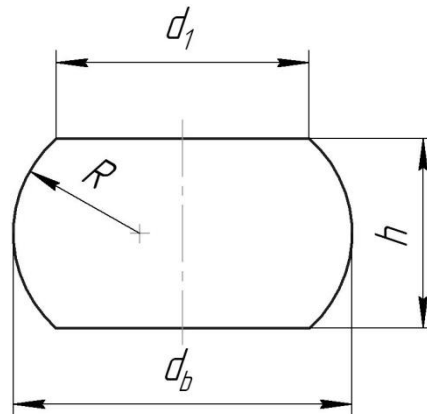


Рис. 1. Осажённая заготовка

С целью оценки характера изменения диаметров d_l и d_b в зависимости от условий трения, степени деформации и относительной высоты исходных заготовок на кафедре М1-КФ КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана планируется провести ряд экспериментов. Результаты исследований позволят приблизиться к решению вопроса теоретического определения формоизменения боковой поверхности поволоков при холодной осадке.

Список литературы

[1] Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие: в 2т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

[2] Евстратов В.А., Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Высшая школа, 1987. – 144 с.

[3] Abhijit Mukhopadhyay. A Systematic Approach to Determine the Impact of Upsetting Ratio During Free Cold Forging Operation of Commercially Pure Aluminium in Dry Condition. International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering (ICAMME 2014). – 2014. – P. 1281-1290.

[4] Malayappan S., Esakkimuthu G. Barrelling of aluminium solid cylinders during cold upsetting with differential frictional conditions at the faces // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. Т. 29. – № 1–2. – P. 41–48.

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru.

Барина Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru.

А.В. Лепченков

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В ходе обработки деталей нельзя получить безупречную поверхность. Под воздействием вибраций, возможных дефектов инструмента, материала заготовки, изменения скорости резания и подачи на поверхности, подверженной обработке, образуются неровности.

Шероховатость представляет собой одну из главных характеристик качества поверхности. К параметрам шероховатости предъявляют требования, которые основаны на функциональности и надежности детали. Параметры шероховатости могут быть определены как измерением, так и теоретически и эмпирическими зависимостями [1, с. 4].

Обеспечение шероховатости основывается на зависимостях между ее параметрами и методами обработки. При этом присутствует некое соотношение между требованиями по точности и высотными параметрами шероховатости [2, с. 34].

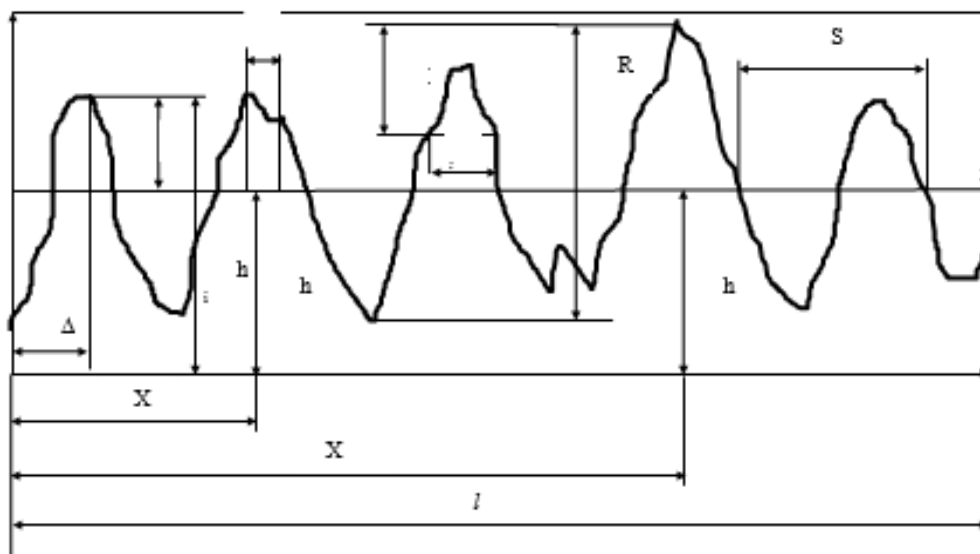


Рис. 1. Высотные и шаговые параметры шероховатости

В первую очередь шероховатость характеризуется своими высотными параметрами. Однако замечено, что поверхности, обладающие одинаковой высотой неровностей, которые были получены различными технологическими методами, могут обладать отличными друг от друга эксплуатационными свойствами.

Также необходимо учитывать, что шероховатость поверхности различна в разных направлениях. Поэтому следует рассматривать как поперечную, так

и продольную шероховатости. Последняя в большинстве случаев соизмерима с высотой неровностей в поперечном направлении.

С уменьшением высоты поперечных микронеровностей, отношение между высотами поперечной и продольной шероховатостей увеличивается, и они становятся примерно одинаковыми. Также это отношение зависит и от материала [3, с. 152-155].

Иногда при механической обработке продольная шероховатость может превышать поперечную. Вибрации оказывают свое влияние в основном на продольную шероховатость. С применением разных методов обработки абсолютные значения опорной площади могут быть различны. Так, например, поверхность с незначительной шероховатостью не всегда будет обладать большой опорной площадью по сравнению с поверхностью, которая имеет более высокую шероховатость, при условии, что эти поверхности были получены разными методами обработки. Отсюда следует, что нельзя ограничиваться одними высотными параметрами шероховатости, чтобы обеспечить требуемую опорную площадь [2, с. 40].

Радиус закругления вершин микронеровностей в продольном направлении часто превышает радиус закругления в поперечном. Углы профиля имеют обратную зависимость. Снижение высоты неровностей обычно приводит к увеличению радиусов закругления выступов и уменьшению углов профиля.

Размеры и высота микронеровностей, их шаги, а также углы профиля и радиусы закругления выступов непосредственно связаны друг с другом. При уменьшении высоты неровностей возрастает соотношение между их шагом и высотой [Там же. С. 41].

Если следует знать наиболее точные значения величин, которые характеризуют качество поверхности, то необходимо взять во внимание такие параметры как материал детали, материал инструмента, необходимую шероховатость и др. Так как все это напрямую связано с различными вариациями параметров качества в зависимости от определенных условий.

Список литературы

[1] Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения – 3-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1969. – 550 с.

[2] Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

[3] Маталин А.А. Технология механической обработки – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. – 464 с., ил.

Лепченков Александр Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

О.С. Федорова

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ НАСЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПРИОБРЕТЕННЫХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Уровень промышленного развития как правило определяется качеством выпускаемых изделий. В свою очередь совокупность тех или иных показателей качества обуславливает результат совершенствования производства. Как правило, свойства изделия напрямую зависят от всех операций, входящих в технологический процесс. Таким образом на качество выпускаемой продукции помимо финишных операций оказывают влияние погрешности, закладываемые в ходе металлургических процессов, заготовительного производства, механической обработки и т.д. Иными словами, на каждом этапе производства имеет место процесс наследования свойств изделия, окончательно определяющих качество продукции. Наиболее ярко наследование проявляется при высоких точностных показателях изделия. При низкой точности наследственные погрешности могут мало влиять на служебное назначение изделий, так как допустимые отклонения параметров оказываются сравнительно большими.

Для современного машиностроения характерной является тенденция роста требований к качеству изделий, резкое увеличение скоростей, температур, точности и др. показателей. Наиболее важным среди прочих в машиностроении является такой параметр как точность. При этом понятие "точность" относится к размеру, форме, расположению поверхностей, твердости материалов и их химическому составу, шероховатости и др. Закономерное ужесточения требований, подмеченное еще английским естествоиспытателем Дж. Берналом, можно проследить на примере изменения в двадцатом веке точности размеров у деталей машин (рис. 1) [Цит. по: 1, с. 4], где графики 1,2,3 – соответственно традиционная, точная и сверхточная обработка.

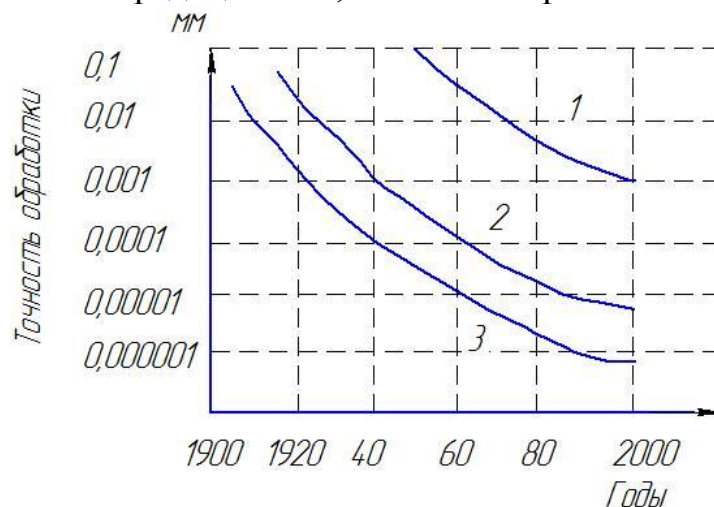


Рис. 1. Повышение точности размеров в текущем столетии

Производство тех или иных деталей машин как правило заключается в поэтапном выполнении операций входящих в технологический процесс в ходе которого происходит качественное изменение исходной заготовки с целью получения детали. Таким образом совокупный результат полученный в ходе осуществления технологического процесса и выраженный через определенные показатели определяет качество изделия. Качество деталей в общем виде представляет собой совокупность свойств и показателей, которые определяют пригодность для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с их назначением. Для определения качества существует большое число различных факторов. С развитием машиностроения естественно изменяются и факторы. Однако, для машиностроения и приборостроения наиболее важными для определения качества продукции являются факторы, относящиеся к эксплуатационным характеристикам изделия. К эксплуатационным характеристикам следует отнести те характеристики, которые определяют качество выполнения изделием заданных функций т.е. надежность (долговечность), динамические качества, эргономичность и экономичность.

В ходе развития машиностроения был накоплен некий опыт определения эксплуатационных свойств изделия. К таким свойствам относят: износостойкость, усталостную прочность, контактную жесткость, виброустойчивость и т.д.

Свойства поверхностного слоя как правило заметно отличаются от свойств присущих основному материалу и обуславливаются параметрами и условиями предшествующей обработки, особенностями воздействия оказываемым со стороны режущего инструмента, а также воздействиями окружающей среды. Таким образом вследствие комбинации поверхностного слоя и основного материала в совокупности представляет собой некий композит. Подобного рода представление видится на сегодняшний день наиболее актуальным в связи с появлением возможностей оказания направленного воздействия на поверхностный слой с целью получения конкретных свойств. Сюда можно отнести легирование поверхностных слоев материала с помощью микродобавок для обеспечения дополнительной защиты, например, посредством ионной имплантации. Так же широкое распространение получил процесс создания защитных оксидных пленок. Немаловажную роль среди физико-механических свойств поверхностных слоев играют остаточные напряжения. Величина, вид, а также общая картина распределения этих остаточных напряжений во многом определяется видами и режимами технологического воздействия на исходный материал. С появлением тех или иных неблагоприятно влияющих остаточных напряжений может наблюдаться снижение конкретных эксплуатационных характеристик. С целью устранения этих неблагоприятных факторов необходимо проводить дополнительные мероприятия. Так отрицательно сказываются на эксплуатационных характеристиках изделий, работающих в

условиях знакопеременных нагрузок растягивающие напряжения возникающих в поверхностных слоях материала. Для их устранения необходимо посредством технологических мероприятий создать противоположные сжимающие напряжения [Там же. С. 11].

Одним из методов создания сжимающих напряжений в поверхностных слоях изделия является пластическое деформирование в ходе которого происходит повышение твердости поверхностного слоя. Помимо этого, формируется регламентированный рельеф микронеровностей на поверхности детали. В результате упрочнения поверхностных слоев при поверхностном деформировании можно обеспечить улучшение физико-механических свойств металла вследствие структурных превращений, измельчения зерен, а также формирования в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, возникающих за счет развития сдвигов в кристаллической решетке [2].

Список литературы

[1] *Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев Ф.С.* Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.

[2] *Лихобабина Н.В., Королев А.А.* Упрочнение поверхностей алмазным выглаживанием // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. №1.

Федорова Оксана Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: oksana.fedorova.92@gmail.com

И.Э. Гинсар

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На сегодняшний день наиболее наглядными и простыми методами определения адгезионной прочности лакокрасочных покрытий являются метод решетчатых надрезов и метод параллельных надрезов. Каждый из этих методов заключается в визуальной оценке адгезионной прочности на основе степени прилипания лакокрасочной пленки к поверхности металла по числу ячеек, отпавших при нарезании пленки. Отличие их состоит в том, что в первом на покрытие наносят сетку надрезов, а во втором только параллельные надрезы, при этом прочность покрытия в этом случае испытывают отрывом наклеенной липкой ленты.

Для проведения эксперимента необходим минимум оборудования: микрометр для контроля толщины покрытия, уйат-спирит, эмаль ПФ-115 любого цвета, краскораспылитель.

В качестве объекта исследования принимаются любые поверхности, подвергаемые окрашиванию, которые называют подложкой. Перед нанесением эмали подложка обеззараживается уйат-спиритом с помощью ткани с последующим протиранием. Согласно выбранной методике толщина нанесенной эмали не должна превышать 60 мкм. В данном эксперименте эмаль наносят на обработанные поверхности методом пневматического распыления с помощью краскораспылителя. Сушку эмали согласно ГОСТ 6465-76 проводят в течение 48 часов.

После полного высыхания эмали с помощью скальпеля по линейке на поверхности образцов делают 5 параллельных надрезов до подложки на расстоянии 1 мм друг от друга. Столько же аналогичных надрезов делают перпендикулярно первым. Адгезию оценивают по состоянию надрезов на покрытии и выражают в баллах (по четырехбалльной системе) в соответствии с таблицей, приведенной ниже:

Таблица 1. Значение баллов в зависимости от процентного соотношения числа отпавших ячеек

Число отпавших ячеек в %	0	До 35	Более 35	70-100
Баллы	1	2	3	4

На основании результатов делается вывод об адгезионной прочности, выраженной в баллах. Чем меньше балл, тем покрытие прочнее.

Список литературы

- [1] *Карякина М.И.* Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
- [2] *Кабанов В.А.* Энциклопедия полимеров // Полиоксадиазолы. – 1977. – №3. – С.15–16.
- [3] *Берлин А.А., Басин В.Е.* Основы адгезии полимеров – М.: Химия, 1969. –320 с.

Гинсар Ирина Эдуардовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: ginsaririna2017@yandex.ru

О.О. Смирнов

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Поверхностная энергия может считаться одним из основных параметров качества поверхностных слоев контактирующих деталей машин наряду с такими качественными показателями, как твердость и шероховатость поверхности. Поэтому при оценке качества сопрягаемых поверхностей необходимо учитывать ее значение.

Определение величины поверхностной энергии деталей машин является достаточно сложной задачей, которая требует комплексного подхода к ее решению. Разработка методов экспериментального определения поверхностной энергии ведется уже достаточно долго и особо актуальна в настоящее время. Особо остро стоит задача в разработке наиболее точного метода, имеющего наименьшую трудоемкость, который возможно было бы внедрить в технологический процесс изготовления деталей машин.

Для металлов в твердом состоянии существует несколько теорий поверхностной энергии: электронная теория; теория и полуэмпирические формулы, в которых за основу взяты упругие свойства металлов; теория, оценивающая энергию металлов в твердом состоянии с учетом их поверхностного натяжения в жидком состоянии; теория межатомного взаимодействия [1].

Наибольший интерес представляет электронная теория поверхностной энергии твердых тел. Обзор электронных теорий был произведен В.С. Алчиновым и А.А. Марковым [1]. Эти теории связывают поверхностную энергию с экспериментально определенными значениями работы выхода электронов или ионизационными потенциалами, а также с числом свободных электронов на атом.

Из всех существующих электронных теорий наиболее точно описывает поверхностную энергию электронная теория, которая связывает ее с величиной работы выхода электрона.

Работой выхода электрона называют разницу между минимальной энергией, которую необходимо сообщить электрону для его «непосредственного» удаления из объема твердого тела, и энергией Ферми.

Работу выхода электрона можно считать базовым параметром твердого тела. Упрощенно электронную теорию поверхностной энергии металлов выглядит следующим образом: ПЭ в значительной степени зависит от сил межатомного взаимодействия, проявлением кото-

рых и является РВЭ [2]. Следовательно, чем больше величина эти силы, тем больше значение РВЭ и, соответственно, тем больше ПЭ [2].

Существует большое количество формул, связывающих РВЭ и ПЭ. Достоинство такой зависимости связано с возможностью определения очень простым путем РВЭ непосредственно как в ходе конструирования, так и разработки технологических процессов [3].

Наиболее убойной для расчетов можно считать предложенную Л.Л. Куниным формулу, т.к. в ней в качестве переменных выступают два параметра: значение работы выхода электрона φ и величина атомного радиуса R [3].

$$\gamma = 7128 \cdot \frac{\varphi}{R^2} - 110. \quad (1)$$

Расчетные величины γ , полученные с помощью этой формулы, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работу выхода электрона контролируемого объекта в приведенной формуле возможно определить измерением контактной разности потенциалов (КРП) и далее рассчитать по следующей формуле:

$$\varphi_{Me} = \varphi_{\mathcal{E}} - e \cdot V_C, \quad (2)$$

где $\varphi_{\mathcal{E}}$ - работа выхода электрона эталона; e - заряд электрона; V_C - контактная разность потенциала исследуемого образца [3].

Контактную разность потенциалов находят экспериментально с помощью применения приборов, работа которых основана на методе Кельвина-Зисмана. Суть этого способа заключается в измерении КРП между поверхностями исследуемого образца и эталона.

Таким образом, метод расчета РВЭ по КРП является наиболее простым и удобным для определения величины поверхностной энергии, что делает его перспективным для применения в процессе изготовления и эксплуатации деталей машин.

Список литературы

[1] Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. Перевод с польского Г.Н. Мехеда. Под ред. Ю.Н. Тарана. - М.: Металлургия, 1978. - 176 с.

[2] Олешко В.С., Пиговкин И.С. Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf> (дата обращения: 26.03.2017).

[3] Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В. Определение значения поверхностной энергии через работу выхода электрона // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16036> (дата обращения: 26.03.2017).

Смирнов Олег Олегович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: olegsmirnov2010@yandex.ru

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.С. Коростелкин, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ ПРИ СВАРКЕ ЛИНЗОВОГО ПАТРУБКА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Линзовый патрубок, показанный на Рис. 1, широко применяется в таких отраслях промышленности как энергетика, химическая и пищевая промышленность, машиностроение, судостроение. Это устройство используется при прокладке трубопроводов, где теплоносителем является вода. Основной функцией таких устройств является снижение различного рода напряжений на фланцевые и сварные соединения, которые возникают вследствие температурной деформации трубопровода.



Рис. 1. Линзовый патрубок

Основные требования, предъявляемые к нему: прочность, надежность, а также устойчивость материала к воздействию агрессивных сред, в частности, морской воды. Для избегания коррозии металла, а также разрушения металла сварного шва применяется сталь 08X18H10T.

Микроструктура этой марки стали в закаленном состоянии представляет собой аустенит. После того как данная сталь подвергнется нагреванию до 450-850°C, начинается выделение карбида хрома на границе аустенитных зерен. При нагревании наблюдается склонность этой стали создавать межкристаллитную коррозию, также снижаются пластичные свойства материала. Возникающая межкристаллитная коррозия – это негативный параметр нержавеющей стали. При межкристаллитной коррозии стали нарушается связь между зернами металла. При этом сталь полностью теряет механическую прочность и разрушается даже при незначительных нагрузках. Явление межкристаллитной коррозии связано с понижением коррозионной стойкости границ зерен. В хромоникелевых аустенитных сталях хром, придающий этим сталям антикоррозионные свойства, растворен в аустените. Под воздействием температур в диапазоне 400-800°C происходит выделение хрома из твердого раствора, по границам зерен содержание понижается до 12% и менее, т.е. ниже того предела, которым обес-

печивается коррозионная стойкость. Если обедненные хромом участки стали в дальнейшем соприкасаются с агрессивной средой, то на этих участках со временем может развиваться межкристаллитная коррозия. [1]

Параметры, режим сварки, скорость кристаллизации и охлаждения и объем сварочной ванны оказывают заметное влияние на структуру сварных швов. При сварке хромоникелевой аустенитной стали 08X18H10T фазовые превращения, т.е. вторичная кристаллизация, сводятся обычно только к выпадению избыточной фазы по границам зерен (кристаллов) аустенита. В то же время под влиянием изменения условий сварки первичная структура хромоникелевых сварных швов претерпевает весьма существенные изменения. Изменение основных параметров режима сварки (напряжение дуги, скорости и тока) оказывает влияние на структуру шва.

Изменение напряжения дуги влияет на интенсивность металлургических процессов в дуговом промежутке. Чрезмерное увеличение напряжения дуги может усилить окисление хрома и титана, что, в свою очередь, может привести к уменьшению количества α -фазы в шве. [2]

Увеличение сварочного тока при неизменной скорости сварки приводит к увеличению объема сварочной ванны. При этом наблюдается заметное укрупнение структуры шва, что весьма нежелательно с точки зрения его коррозионной стойкости. На Рис. 3 (а-в) для сравнения приведены структуры в шве для стали 08X18H10T толщиной 10, 50 и более 70 мм.

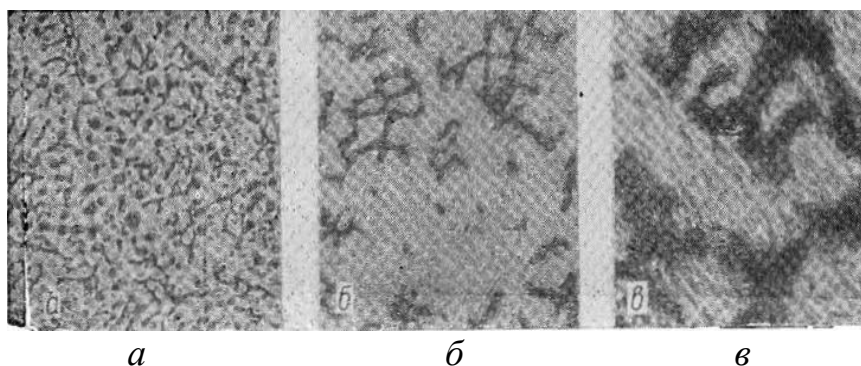


Рис. 3. Влияние условий сварки (объема ванны) на первичную структуру однопроходного автоматного шва стали 08X18H10T при 130-кратном увеличении: а) на стали толщиной 10 мм; б) толщиной 50 мм; в) толщиной более 70 мм

Увеличение скорости сварки сопровождается заметным измельчением первичной структуры сварных хромоникелевых швов. На Рис. 4, 5 представлена структура швов стали 08X18H10T с различной скоростью сварки от 30 до 130 м/час при равной и различной погонной энергии. По мере увеличения скорости происходит измельчение структуры швов, благоприятно сказывающееся на коррозионной стойкости. [3]

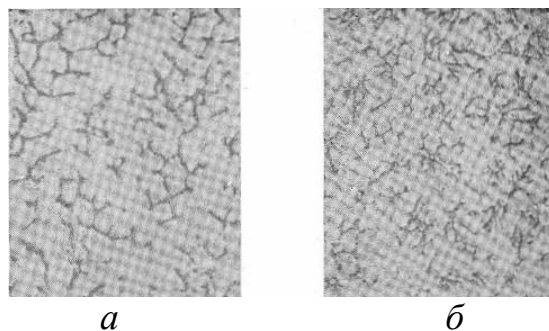


Рис. 4. Влияние скорости сварки на первичную структуру швов стали 08X18H10T при погонной энергии 0,6 квт-ч/м: а) $V_c=30$ м/ч; б) $V_c=130$ м/ч (130-кратное увеличение)

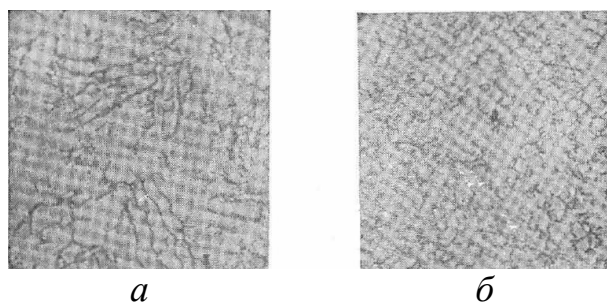


Рис. 5. Влияние скорости сварки на первичную структуру швов стали 08X18H10T при разной погонной энергии: а) $V_c=42$ м/ч; б) $V_c=131$ м/ч (130-кратное увеличение)

На основе полученных данных можно сделать вывод, что для обеспечения стойкости стали к межкристаллитной коррозии необходимо разработать технологию изготовления линзового патрубка и осуществить выбор оптимальных режимов сварки, обеспечивающих эксплуатационные свойства изделия.

Литература

[1] Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. В. Технология и оборудование сварки плавлением: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2002. 432 с.

[2] Баранов А. Н., Константинова М. В., Гусева Е. А., Гречнева М. В. Межкристаллитная коррозия аустенитных сталей // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2 (26). С. 142-147.

[3] Дедюх, Р.И. Тепловые процессы при сварке. [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Томск: ТПУ, 2013. – 124 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/45135>

Коростелкин Александр Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smarkquest@yandex.ru

Орлик Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

Орлик Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

М.С. Козлова, И.Н. Зыбин

ОСОБЕННОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКОЙ И ПРИВАРКОЙ ЛЕНТЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Восстановление изношенных поверхностей различных деталей машин и механизмов электроконтактными способами является эффективным способом продления их срока службы.

В настоящее время применяется несколько разновидностей восстановления деталей данными способами. К ним, например, можно отнести электроконтактную наварку проволокой и электроконтактную приварку лент.

При эксплуатации детали часто работают в условиях усталостного нагружения. Одним из основных факторов, влияющих на усталостную прочность восстановленных деталей, является величина, знак и характер распределения остаточных напряжений. Они могут по-разному влиять на усталостную прочность. В отличие от сжимающих остаточных напряжений, растягивающие остаточные напряжения, как правило, оказывают негативное влияние на усталостную прочность. В связи с этим, актуальным является анализ остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактными способами, в частности, наварки проволокой и приварки стальной лентой. Для обеспечения надежности и работоспособности восстановленных деталей необходимо обеспечить благоприятное распределение остаточных напряжений.

Определению остаточных напряжений после электроконтактного восстановления деталей посвящено достаточно мало работ. В частности, в работах [1,2] исследуются остаточные напряжения при электроконтактной наварке проволокой и приварке ленты.

В работе [1] изучалось влияние химического состава и свойств сталей на остаточные напряжения в приваренном слое ленты. Испытанию подвергались образцы из коррозионно-стойких сталей различного класса. Согласно методике, при испытании образцов проводились замеры остаточных напряжений с учетом действительных значений и характеристик упругости с помощью специальной установки. Далее определялись относительные деформации с помощью активного и компенсирующего тензорезисторов. По полученным и обработанным данным строились зависимости напряжений от радиуса образца. На основе экспериментальных зависимостей были сделаны выводы, что детали, восстановленные приваркой металлической ленты, имеют высокие остаточные напряжения растяжения, что в дальнейшем может привести к снижению их усталостной прочности при эксплуатации.

В работе [2] для определения остаточных напряжений в наваренных образцах применялось две методики. Первая методика заключалась в использовании метода Н.Н. Давиденкова, согласно которому для определения тангенциальных деформаций использовались разрезные втулки, а для определения осевых деформаций – полоски. В результате последовательного удаления наружных поверхностных слоев металла травлением с полосок и втулок фиксировались их деформации. Согласно второй методике использовался метод пенетрации, при котором в поверхностные наваренные слои вдавливался индентор в виде шарика с целью замеров упругопластических деформаций. При этом для оценки напряжений применялся метод электронной спеклинтерферометрии с фиксацией видов распределения интерференционных полос после вдавливания индентора в поверхность образца.

Полученные в работе [2] результаты показали, что при наварке пружинной проволокой ПК-2 на образцы их стали 45 остаточные осевые и тангенциальные напряжения являются сжимающими, но незначительными по величине. При этом тангенциальные остаточные деформации по значениям больше осевых и достигают 65,4 МПа.

Разный знак остаточных напряжений в поверхностном слое образцов при наварке проволокой и приварке ленты можно объяснить тем, что при приварке ленты ее деформация практически отсутствует, вследствие большей жесткости ленты по сравнению с проволокой. В то же время при наварке проволокой пластические деформации в ее поперечном сечении могут достигать величины более 70% со значительной осевой деформацией.

В связи с тем, что в поверхностном слое деталей, наваренных проволокой, формируются сжимающие остаточные напряжения, а при приварке лент – растягивающие остаточные напряжения, то для деталей, испытывающих динамические нагрузки, более рациональным способом восстановления является электроконтактная наварка проволокой. Все это в совокупности с подачей охлаждающей воды в зону наварки способствуют формированию сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали при наварке проволокой.

Список литературы

[1] *Фархитов М.Н.* Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионно-стойких сталей. – Уфа: БГАУ, 2006 – 4 с.

[2] *Нафиков М.З.* Техничко-технологическое обоснование восстановления автотракторных деталей типа «вал» электроконтактной наваркой стальных проволок. – Уфа: БГАУ, 2010. – 373 с.

Козлова Мария Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: mariya.kozlova2013@yandex.ru

Зыбин Игорь Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

А.А. Родин, И.Н. Зыбин

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Напыление используется как способ нанесения покрытия на поверхности различных деталей машин и механизмов, инструмента и других изделий для повышения их износостойкости, жаростойкости, теплоизоляционных и электроизоляционных свойств, коррозионной стойкости и т. д.

Напыление осуществляется за счет теплоты, образуемой в результате сгорания различных горючих газов в среде кислорода [1].

В зависимости от состояния напыляемого материала газопламенное напыление может быть трех типов: напыление проволокой, прутком и порошком.

Напыляемый материал подается через центральное отверстие горелки и расплавляется пламенем горючей смеси. Расплавленные частицы металла в мелкораспыленном виде подхватываются струей сжатого воздуха и направляются на поверхность изделия.

В качестве горючего газа используется ацетилен, также может применяться пропан и водород. Напыление в газопламенном способе осуществляется в основном теми материалами, температура плавления которых ниже температуры горения горючей смеси [2].

Для восстановления деталей целесообразно использовать напыление порошками. Применение порошков позволяет в более широком диапазоне по сравнению с проволоками изменять состав наносимых покрытий, что повышает прочность сцепления с основой. При восстановлении деталей с целью получения износостойких покрытий применяются порошковые сплавы системы $Ni - B - Cr - Si$, а для напыления подслоев - экзотермические сплавы. Для напыления стальных и чугуновых деталей, работающих в условиях трения, применяют также стальные проволоки с содержанием 0,3–0,8% C , хромистые с содержанием 13% Cr , аустенитные, хромоникелевые и др. [1].

В зависимости от ряда факторов (материала и назначения детали, условий эксплуатации детали, и т.д.) используются следующие способы газопламенного напыления [3]:

Без оплавления поверхности, используется, как правило, для восстановления деталей с износом до 2 мм.

С одновременным оплавлением, применяется, обычно при износе восстанавливаемой поверхности до 3–5 мм, работающих при знакопеременных и ударных нагрузках.

С последующим оплавлением для восстанавливаемых деталей с износом до 2,5 мм.

Газотермическое напыление без оплавления отличается нестабильной и невысокой прочностью сцепления металлов (менее 30...50 МПа). Характерной особенностью таких покрытий является пористость, которая может достигать 20% [4]. Невысокая прочность сцепления металлов наряду с пористостью покрытия ограничивают применение этого способа для восстановления различных деталей. Однако в ряде случаев наличие пористости покрытия улучшает условия контактирования деталей в условиях изнашивания при наличии смазки [6].

Повысить прочностные свойства напыленного металла позволяет применение оплавления. Оплавление напыленного покрытия дает возможность снизить пористость за счет образующейся жидкой фазы, которая заполняет поры, полученные при напылении [1]. Также заметно возрастает прочность сцепления металлов. Например: при газопламенном напылении самофлюсующегося порошка ПГ – АН – 33 ацетилено-кислородным пламенем на пластину, изготовленную из стали 45 прочность сцепления покрытия с основой составляет без оплавления 10 – 20 МПа, а при оплавлении 400 – 500 МПа [4].

Однако перед оплавлением поверхности необходим предварительный подогрев детали до 800...900 °С, что может приводить к значительному термическому влиянию на основной металл, и как следствие, к изменению структуры, свойств и короблению деталей [5].

Таким образом, при выборе способа газотермического напыления следует учитывать требования, предъявляемые к восстанавливаемым деталям (например, прочности сцепления металлов, пористости) и условия эксплуатации детали.

Список литературы

[1] Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение; 1987. – 192 с.

[2] Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление/Пер. с яп. Х12 В. Н. Попова; Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

[3] Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.

[4] Корж В.Н., Попиль Ю.С. Обработка металлов водородно-кислородным пламенем. – К.: Екотехнологія, 2010. – 194 с.

[5] Антошин Е.В. Газотермическое напыление покрытий. – М.: Машиностроение, 1974. – 97 с.

[6] Самоходский А.Н., Кунявский М.Н. Металловедение. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1967. – 456 с.

Родин Артем Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 23911248q@gmail.com

Зыбин Игорь Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Чжо Зай, В.В. Прасицкий

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ НАТРИЕВЫХ РАЗРЯДНЫХ ЛАМП

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Несмотря на постоянные попытки улучшения электродов дуговых осветительных ламп высокого давления с парами металлов, применяемые в них спиральные электроды практически не претерпели конструктивных изменений [1-3]. Как правило, все они имеют вид, изображенный на рис.1 и являются по физической сути пленочными термоэмиттерами.

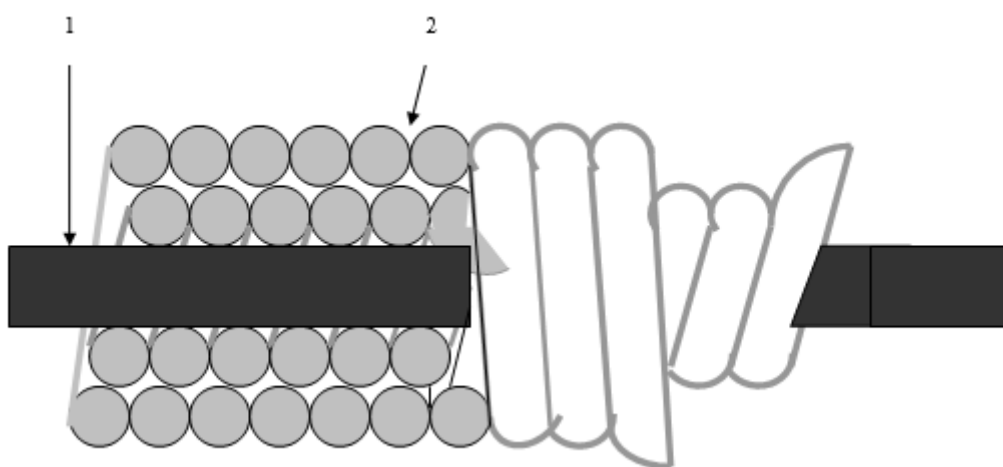


Рис.1. Спиральный электрод

На вольфрамовый керн 1 надета двухслойная вольфрамовая спираль 2. Промежутки между витками спирали, а иногда и пространство между керном и спиралью, заполняется эмиссионно-активным веществом, в качестве которого используются оксиды, цирконаты, вольфраматы щелочноземельных, а также оксиды редкоземельных элементов. Спиральные электроды относительно просты по конструкции, но обладают достаточно высокой эффективностью и долговечностью. Это объясняется наличием отдельных конструктивных элементов, выполняющих различные функции на различных этапах разряда.

На начальном этапе при подаче напряжения питания на лампу, когда давление газового наполнения находится на уровне 2,5 кПа, а ртутно-натриевые пары обеспечивают условия существования смеси Пеннинга, основную роль играет вольфрамовая спираль с нанесенным на нее эмитирующим веществом. Она выполняет функции холодного катода, являясь поставщиком электронов в зону тлеющего разряда, в решающей степени определяя такой важный параметр как напряжение зажигания лампы. Аномальный тлеющий разряд, разогревая электрод, создает условия для возникновения ка-

тодного пятна с высоким уровнем термоэмиссии – начинается стадия дугового разряда низкого давления.

После возникновения дугового разряда по мере роста давления паров металла в лампе увеличивается градиент напряжения положительного столба и катодное пятно переходит на торцевую часть катода. Теперь активированная спираль начинает играть роль поставщика эмиссионного вещества на вольфрамовый керн: результатом является снижение работы выхода в зоне пятна и как следствие – существенное уменьшение температуры торца керна.

Законченного теоретического расчета, позволяющего найти оптимальные размеры электрода, не существует. На практике используется метод, предложенный Рохлиным [4], основывающийся на компромиссной необходимости обеспечения нескольких условных характеристик. Температура спирали не должна быть слишком высокой, чтобы не происходило испарение активного вещества. С другой стороны, ее снижение может привести к недостаточному количеству активного вещества, поступающего на торец керна. Спираль нагревается в результате передачи тепла от керна, а с другой стороны она же служит своеобразным радиатором, отдающим тепло в виде излучения. Поэтому общий тепловой баланс существенно зависит от площади излучающей поверхности. В настоящее время существует практически единственный, чисто эмпирический, подход к определению размеров, основывающийся на геометрическом подобии четырех основных размерных параметров электрода, сведенных к одному – диаметру d вольфрамовой проволоки, из которой навивается спираль, а также выбору температурных режимов по специальной номограмме.

Геометрические размеры определяются из условия сочетания оптимальных температур торца вольфрамового керна $T_{ек}$ и спирали $T_{сн}$, создающих наилучшие условия для конкретного типа применяемого эмиссионного вещества. Так, к примеру, для спирали с активным веществом из оксидов щелочноземельных материалов и тория рекомендуют использовать $T_{сн} = 1500K$ и $T_{ек} = 1870K$, а для активатора из оксида бария считают оптимальными $T_{ек} = 1600 - 1870K$.

Определенной разновидностью эмиттера является достаточно редко применяемый на практике электрод с ‘утопленным’ керном: часть спирали, обращенная к разряду, образует полость, и при определенных условиях возникает эффект полого катода [5-8]. Считается, что это положительно сказывается на напряжении и надежности зажигания, а также снижает эрозию катодного материала. Следует отметить, что описанные электроды исчерпали потенциальные возможности своего совершенствования и при этом им остались присущи существенные недостатки.

Количество активного вещества ограничивается возможностью механической адгезии к поверхности вольфрамовой спирали и на практике

находится на уровне порядка 2,5 мг. При этом коэффициенты термического расширения активатора и вольфрама существенно различны, что приводит к его осыпанию в результате жестких термоциклов при включении лампы, т.к. скорость нагрева электрода достигает 10^5 K/c. Немаловажным фактором является высокая стоимость вольфрамовой проволоки и высокие требования к механическим свойствам вольфрама, используемого для навивки спирали, невыполнение которых является частой причиной брака.

Анализ литературных и практики промышленного применения спиральных электродов показывает, что в их конструкции существует два принципиальных недостатка: малое количество эмиссионно-активного вещества и его поверхностное размещение на вольфрамовой спирали.

Список литературы

[1] Антошкин Н.Ф., Салкин А.В., Харитонов А.В. Ртутные лампы высокого давления типа ДРЛ. Изд. Мордовского университета. 1992, 140с.

[2] Атаев А.Е. Зажигание ртутных разрядных источников излучения высокого давления. М.: МЭИ, 1995. 168 с.

[3] Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977. 344 с.

[4] Рохлин Г. Н. Газоразрядные источники света. М.: Энергия, 1966. 560 с.

[5] Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.

[6] Решенов С.П. Расчет характеристик активной зоны полого катода в условиях дугового разряда // Светотехника. 1978. № 8. с. 10-11.

[7] Полюй катод в газоразрядной лампе / Н.Ф. Антошкин [и др.] // Тез. докл. VIII Всес. научн. конф. по светотехнике. Саранск, 1981. Ч. 2. с. 65-67.

[8] Решенов С. П., Рыбалов С. Л. Спиральные электроды с режимом полого катода // Тез. докл. Всес. научн.-техн. совещания по состоянию разработок и производства газоразрядных источников света. Полтава, 1982. с. 12-14.

Чжо Зай – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawzay49@gmail.com

Прасицкий Василий Витальевич – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sintel40@yandex.ru

Йе Еинт Ко Ко, С.М. Твердова

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КОНТАКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЕЧЕННОЙ КОМПОЗИЦИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Из порошков проводника и диэлектрика можно получить композицию, обладающую свойством электрической проводимости [1-3]. Величина электросопротивления такого материала может быть изменена путем регулирования соотношения между проводящими и изолирующими компонентами. В качестве проводящей фазы в такой двухфазной системе, лежащей в основе изготовления керметов [1, 2], может использоваться металл или иное металлоподобное вещество, в качестве изолирующей фазы – любой диэлектрический материал, например, керамический окисел. Использование тугоплавких исходных компонентов, не взаимодействующих между собой, позволит изготовить композиционный материал (кермет), способный работать в качестве нагревателя.

Тело, сформованное из порошка двухфазной композиции, будет токопроводящим в том случае, если частицы проводящей фазы соприкасаются между собой по всему объему образца, образуя токопроводящие цепочки; в свою очередь, эти цепочки, пересекаясь, дадут непрерывную проводящую сетку, пронизывающую весь объем тела.

Для наглядности можно предположить, что проводящие частицы имеют форму одинаковых кубов, прилегающих друг к другу своими гранями, образуя непрерывные стержни. В свою очередь, стержни, пересекаясь, дают трехмерную сетку. Расстояния между проводящими стержнями одинаковы, и сетка имеет вполне упорядоченный характер (рисунок 1, а).

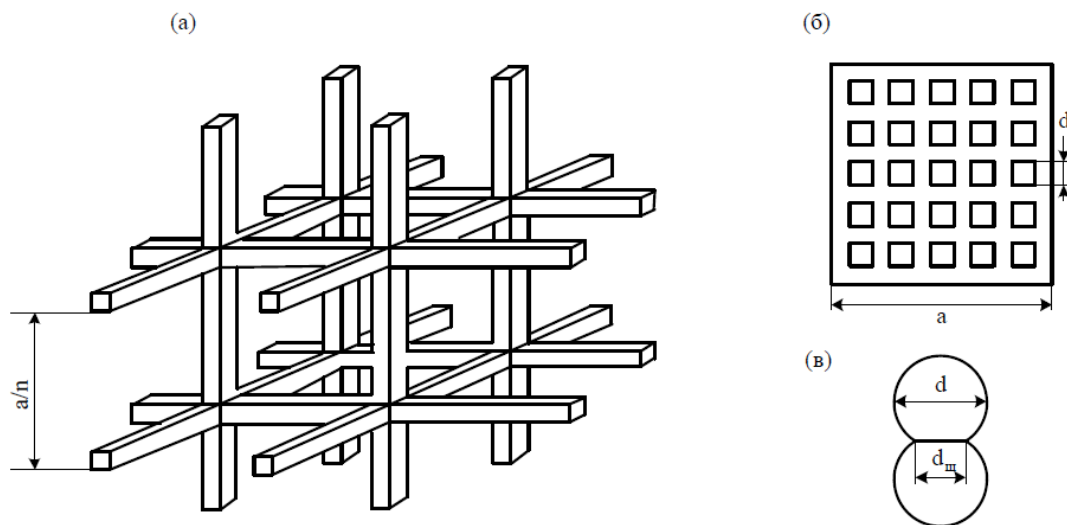


Рис. 1. Схема токопроводящей цепи кермета

Более близкой к реальности является ситуация, в которой проводящие цепочки построены из шаровых частиц, которые в результате спекания соединяются между собой с образованием шейки. Обычно во всех металло-керамических телах, изготовленных из спеченных порошков, мы имеем приблизительно такую картину контактирования частиц. Процесс спекания порошковой композиции приводит к образованию между частицами шеек (мостиков); при достаточно большой концентрации токопроводящей фазы (более 50 об. %) шейки между ними образуются всегда. Диаметр шеек, как правило, значительно меньше размера самих частиц.

Допустим, что образец спеченной композиции имеет форму куба с ребром "а". На каждую грань кубического образца выходят концы проводящих цепочек – диаметр частиц примем одинаковым и равным d (ребро проводящей частицы) в количестве $n \cdot n = n^2$ (имеются в виду проводящие частицы, лежащие на грани образца, рисунок. 1, б). Коэффициент контактирования частиц, равный отношению диаметров шейки $d_{ш}$ и частицы d (рисунок. 1, в).

$$m = \frac{d_{ш}}{d} \quad (1)$$

При приложении напряжения к двум противоположным граням кубического образца ток пойдет лишь по проводящим мостикам, перпендикулярным этим граням. Тогда общее сопротивление сетки определится по формуле:

$$R_{общ.} = \frac{2\rho a}{\pi(c')^2 \sqrt{1-m^2}} \ln \frac{1+\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2}} \quad (2)$$

$$c' = cP_M. \quad (3)$$

ρ – удельное сопротивление материала проводящей фазы, P_M – сумма вероятностей контактирования центральной частицы, $c = nd$.

Диаметр контактной шейки между частицами в керметовой композиции зависит от многих факторов. В первую очередь он зависит от давления при прессовании порошка и температуры спекания. Как видно из формулы (2), это в свою очередь оказывает влияние на величину электросопротивления получающегося материала.

Представим формулу (2) в ином виде:

$$R_{общ.} = \frac{2\rho a}{\pi(c')^2} R(m), \quad (4)$$

где

$$R(m) = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \ln \frac{1+\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2}}. \quad (5)$$

На рисунке 2 представлена зависимость функции $R(m)$ от коэффициента контактирования частиц m . Из графика видно, что при изменении

степени контактирования частиц от 0,2 до 0,9 функция $R(m)$ изменяется всего в два раза, т.е. зависимость удельного электросопротивления от величины контактирования частиц сравнительно слабая.

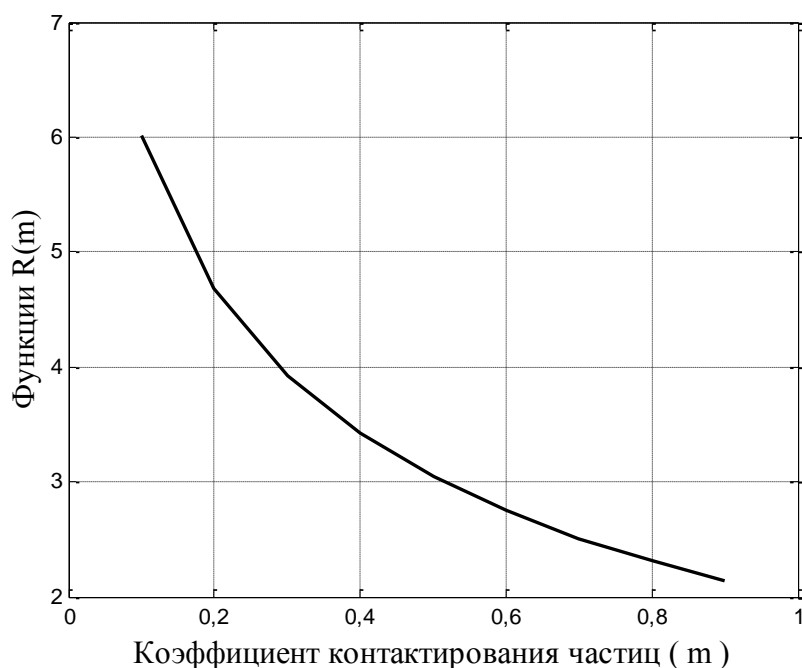


Рис. 2. Зависимость функции $R(m)$ от коэффициента контактирования частиц m

Особо отметим, что в выражениях (4) и (5) наблюдается выполнение граничных условий для m , т.е. при $m = 0$, $R(m) = \infty$, а при $m = 1$, $R(m) = 0$. При отсутствии контактирования металлических частиц проводимость исчезает ($R_{общ.} \rightarrow \infty$), а при полном контактировании имеем переход к модели, представленной на рисунке 1, а, когда переходное сопротивление контактов между частицами равно нулю.

Список литературы

- [1] Кислый П.С., Боднарук Н.И., Боровикова М.С. и др. Керметы. – Киев: Наук. думка, 1985. – 272 с.
- [2] Пат. США № 2.845.515, кл. 201-63. Полуметаллические, обладающие сопротивлением нити накала. 1953.
- [3] Брит. пат. № 895.238, кл. 39 (1). Катодные материалы и их производство. 23.01.1959.

Йе Еинт Ко Ко – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ueyintkoko49@gmail.com

Твердова Светлана Михайловна – канд. техн. наук, преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

А.Н. Шмаков, В.В. Андреев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В МДП-СТРУКТУРАХ С ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ ДВУОКИСИ КРЕМНИЯ ЛЕГИРОВАННОЙ ФОСФОРОМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из перспективных методов модификации электрофизических характеристик МДП-структур является инжекция электронов в диэлектрик в сильных электрических полях [1-3], позволяющая проводить индивидуальную коррекцию параметров каждого прибора. Наилучшие практические результаты этот метод дает при использовании МДП-структур, подзатворный диэлектрик которых содержит электронные ловушки, способные захватывать часть инжектированных электронов [2-5]. Одним из эффективных способов создания электронных ловушек в объеме подзатворного диэлектрика является пассивация термической двуокиси кремния пленкой ФСС [4,6]. Поэтому дальнейшее рассмотрение инжекционной модификации будем проводить, используя МДП-структуры с пленками SiO₂-ФСС.

В данной работе рассмотрена возможность модификации электрофизических характеристик МДП-структур с пленкой SiO₂, легированной фосфором путем туннельной инжекции электронов в диэлектрик в сильных электрических полях.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической двуокиси кремния и термической двуокиси кремния, пассивированной пленкой фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией <100>. Двуокись кремния толщиной 30±100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси POCl₃-O₂ при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировалось время загонки фосфора в пределах от 3 до 6 минут. Затем пластины отжигались в атмосфере азота при температуре 1000°С. Алюминиевые электроды напыляли магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С. В качестве затворов также использовались пленки поликремния (Si*), легированные фосфором.

В результате были изготовлены МДП-конденсаторы с подзатворным диэлектриком SiO₂ и четыре группы образцов с двухслойным диэлектриком SiO₂-ФСС, отличающиеся параметрами слоя ФСС, которые приведены в таблице 1. Технологический процесс диффузии фосфора контролировался по измерениям величины сопротивления растекания диффузионных

слоев, а толщина пленки ФСС измерялась методом химического травления в селективном травителе [6].

Контроль толщины подзатворного диэлектрика проводился с использованием эллипсометрического микроскопа ЛЭМ-3М.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием $C-V$ метода и метода управляемой токовой нагрузки [5,6], заключавшегося в приложении к образцу импульса тока специальной формы, обеспечивающего заряд емкости МДП-структуры и последующую сильнополевую туннельную инжекцию электронов в диэлектрик, обычно осуществляемую в режиме протекания постоянного тока. В течение сильнополевой инжекции измерялось приращение напряжения на МДП-структуре DVI, характеризовавшее изменение зарядового состояния МДП-структуры [6]. Контроль термополевой стабильности зарядового состояния МДП-структуры после модификации оценивался с помощью метода релаксации $C-V$ характеристик в изотермических условиях при нескольких фиксированных температурах.

Таблица 1. Параметры пленки ФСС

Параметры	Номер группы			
	I	II	III	IV
1. Время загонки фосфора, мин.	10	6	4	3
2. Толщина слоя ФСС, нм	41	27	19	12
3. Концентрация фосфора в ФСС, %	3	2	1	0,7

Увеличение времени загонки фосфора приводит к увеличению толщины слоя ФСС, и, следовательно, можно ожидать рост плотности заряда электронов, захваченных на электронные ловушки в этом слое при сильнополевой туннельной инжекции [5,6]. Такая тенденция наблюдалась в ранее проведенных работах. Однако в широких пределах изменения времени загонки такие исследования не проводились.

Следует отметить, что увеличение толщины пленки ФСС вызывает уменьшение толщины пленки двуокиси кремния при одной и той же толщине многослойного диэлектрика. При увеличении толщины слоя ФСС следует ожидать положительного эффекта увеличения степени изменения зарядового состояния многослойного диэлектрика при инжекционной модификации. Кроме того, уменьшение толщины пленки двуокиси кремния уменьшает интенсивность накопления положительного заряда, что повышает зарядовую стабильность многослойного подзатворного диэлектрика в целом.

Однако проведенные измерения на структурах из группы I показали, что увеличение времени загонки фосфора вызывает резкое снижение устой-

чивости многослойного диэлектрика к инжекционным перегрузкам. При этом многие структуры были короткозамкнутыми. Поэтому при проведении дальнейших исследований структуры I группы не рассматривались.

Причиной снижения инжекционной стойкости и повышения дефектности может являться локальная сквозная диффузия атомов фосфора. Однако данный вопрос требует проведения отдельных дополнительных исследований.

Высокочастотные $C-V$ характеристики, измеренные на МДП-структурах III группы при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик из кремниевой подложки (1,2,3) и затвора (1 ϕ ,2 ϕ ,3 ϕ) электродов приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка, при инжекции электронов из подложки (положительная полярность Al-электрода) наряду с накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС, приводящего к сдвигу $C-V$ кривых в сторону положительных напряжений, происходит увеличение плотности поверхностных состояний и, следовательно, деградации границы раздела Si-SiO₂, что может ухудшить параметры модифицируемых приборов. На начальном этапе инжекции электронов из затвора (рисунок 1, кривая 1 ϕ) изменение зарядового состояния МДП-структур характеризуется накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС без увеличения плотности поверхностных состояний. Накопление отрицательного заряда в структуре с пленкой SiO₂-ФСС связано с захватом части инжектированных электронов на ловушки в слое ФСС [6].

На рисунке 2 представлены зависимости приращения напряжения середины зоны DV_{MG} от величины инжектированного заряда для образцов различных групп (таблица 1).

Изменение $C-V$ характеристик для различных групп образцов имело схожий характер, отличаясь лишь количественными параметрами. Результаты, приведенные на рисунке 2, показывают, что с увеличением концентрации фосфора и, соответственно, толщины слоя ФСС возрастает концентрация электронных ловушек в слое ФСС [5]. Увеличение концентрации электронных ловушек приводит к возрастанию скорости и величины накопления отрицательного заряда (рисунок 2, кривые 1 и 1').

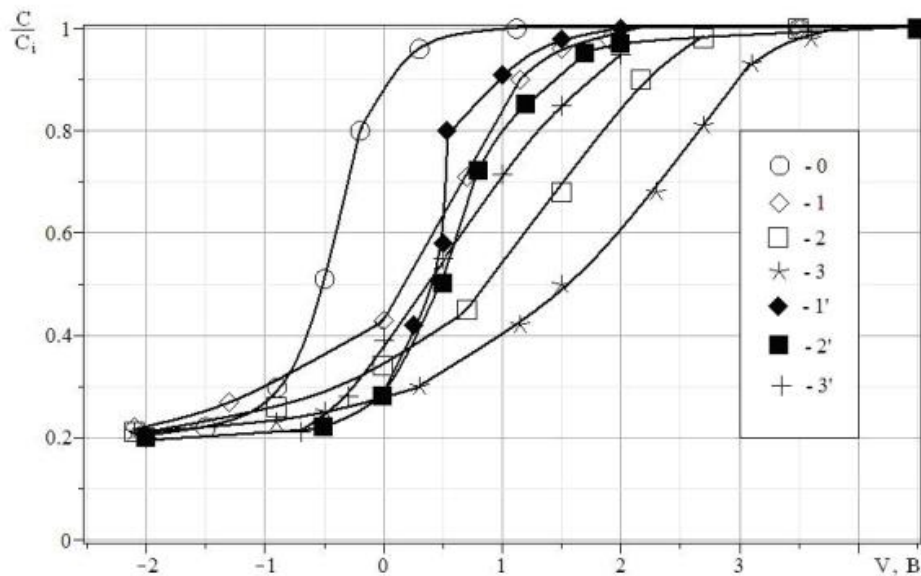


Рис. 1. Высокочастотные C-V характеристики, измеренные на МДП-структурах III группы при инъекции электронов импульсами постоянного тока 1 мкА/см^2 при положительной (1,2,3) и отрицательной (1',2',3') полярности затвора. Кривая 0 измерена до проведения инъекции, а кривые 1,2,3,1',2',3' – после инъекции заряда различной величины: (1, 1') – $0,1 \text{ мКл/см}^2$, (2, 2') – $0,15 \text{ мКл/см}^2$, (3, 3') – $0,2 \text{ мКл/см}^2$

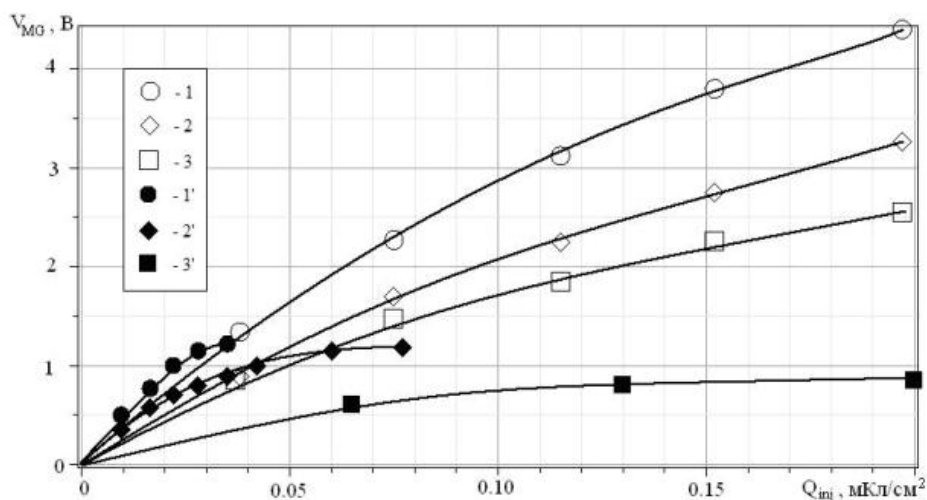


Рис. 2. Зависимости приращения напряжения середины зоны МДП-структуры от величины инжектированного заряда (плотность тока 1 мкА/см^2) при положительной (1, 2, 3) и отрицательной (1', 2', 3') полярности затвора. Зависимости получены для образцов различных групп (табл. 1): II – (1, 1'); III – (2, 2'); IV – (3, 3')

Таким образом, проведенные исследования показали, что при инъекции электронов из затвора накопление отрицательного заряда может происходить лишь до определенной величины, при превышении которой за счет увеличения локального электрического поля в диэлектрической пленке

ке [6] происходит пробой диэлектрика. При инжекции электронов из кремния с увеличением концентрации фосфора и ростом толщины слоя ФСС увеличивается диапазон возможных изменений порогового напряжения МДП-транзисторов. Однако для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать $0,1 \text{ мКл/см}^2$.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Список литературы

[1] Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. Proceedings of the IEEE// 1969. V.57. P.1558-1563.

[2] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V. 27. P.377-380.

[3] Sharma Y.K., Ahyi A.C., Issacs-Smith T., Shen X., Pantelides S.T., Zhu X., Feldman L.C. Phosphorous passivation of the SiO₂/4H-SiC interface. Solid-State Electronics// 2012. V. 68. P.103–107. [4] Левин М. Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем// Микроэлектроника. 2006. Т.35. №5. С.382-391.

[5] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Modification and Reduction of Defects in Thin Gate Dielectric of MIS Devices by Injection-Thermal and Irradiation Treatments// Phys. Status Solidi C. 2015. V.12. No.1–2. P.126–130.

[6] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – Г.2, п.2.2 – 42 с.

Шмаков Андрей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ArhangelSD@yandex.ru

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Е.В. Демидов, А.А. Корнюхин, А.В. Крылов, М.А. Токаев

КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УЗЛЫ ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

ООО "Инновации"

ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов"

Федеральное казенное предприятие "Казанский завод точного машиностроения"

В последние годы на рынке медицинского оборудования появились маммографические аппараты [1], обеспечивающие получение объемного изображения за счет перемещения малогабаритной однолучевой рентгеновской трубки вокруг неподвижной грудной железы. В качестве альтернативы, позволяющей существенно упростить конструкцию маммографа с томографической функцией [2] предложено использовать рентгеновскую трубку с необходимым для получения качественных объемных изображений количеством катодов. Схема предложенной трубки приведена на рис. 1. В случае использования такой трубки отпадает необходимость осуществления сложного движения трубки, резко снижается тепловая нагрузка на анод, но в тоже время возрастают требования к конструкции катодов. Разработке катодов для многолучевой рентгеновской трубки и посвящена данная работа.

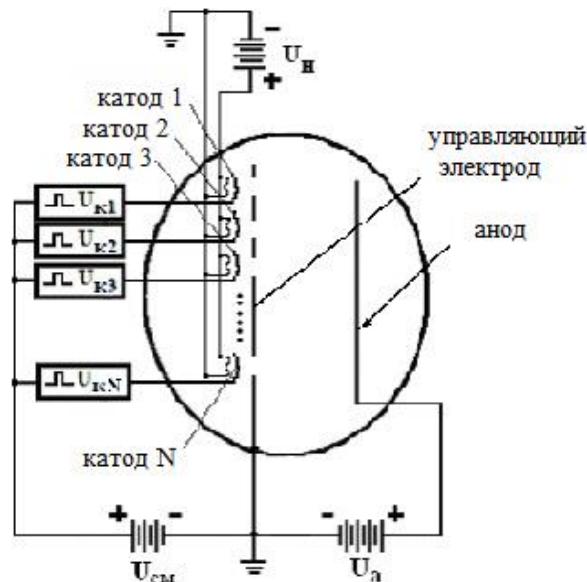


Рис. 1. Электрическая схема включения многолучевого рентгеновского излучателя

В большинстве используемых в настоящее время рентгеновских трубок применяются прямонакальные катоды, выполненные в виде спирали. Они имеют высокую рабочую температуру (более 2000°C) и малый ресурс

(нескольких тысяч часов). Поэтому при разработке конструкции КПУ был выбран металлопористый катод, эмитирующая поверхность которого покрыта пленкой осмия. Приведенные электронно-оптические расчеты показали, что, используя катод с диаметром эмитирующей поверхности 2 мм, удастся сформировать на аноде рентгеновской трубки электронное пятно шириной 0,3 мм и длиной 3 мм.

Катодно-подогревательный узел (КПУ) состоит из обоймы с эмиттером диаметром 2 мм, блока экранов, держателя, заплавленного подогревателя и управляющего электрода. Внешний вид КПУ, управляющего электрода и заплавленного подогревателя приведены на рис.2.



Рис. 2. Внешний вид КПУ, управляющего электрода и подогревателя

Эмиттер представляет собой пористый вольфрамовый штабик диаметром 2мм, пропитанный барий-кальциевым алюминатом. На торцевую поверхность эмиттера нанесена пленка осмия толщиной 0,5мкм. Боковая поверхность обкатана для уменьшения испарения бария. Подогреватель катода представляет собой керамический корпус с габаритным диаметром 1,6мм и высотой 3,7мм с размещенной внутри спиралью в виде бифиляра из проволоки ВР-20 диаметром 0, 2мм. Технология составляющих КПУ рентгеновской трубки металлопористых (импрегнированных) катодов является традиционной [3]. Трудность изготовления катодов связана с их малыми размерами. Критическими операциями являются изготовление вольфрамового эмиттера, молибденовой обоймы, обкатки боковой поверхности эмиттера, изготовление подогревателя. При изготовлении подогревателя применялась технология, использующая капиллярные эффекты при заполнении расплавленной окисью алюминия технологической формы с расположенной внутри спиралью, подробно описанная в [5].

Пирометрирование КПУ проводилось на вакуумной установке УРМ при вакууме не хуже 10^{-4} Па фотопирометром фирмы Raytek серии MarathonMM с точностью до 1° С. Результаты пирометрирования представлены в табл.1 и на рис.6.

Разработанные катоды были испытаны в составе многоэмиттерной рентгеновской трубки, с помощью которой получено качественное томографическое изображение. Прогнозируемый ресурс катодов при плотности тока 5 А/см^2 составляет не менее 50 тыс. часов.

Для рентгеновской трубки с 31 катодом в целях снижения мощности накала был разработан второй вариант металлопоритового КПУ с диаметром эмиттера 1,5мм. Благодаря использованию заплавленного подогревателя диаметром 2,5мм и высотой 1мм, весь КПУ удалось разместить в керамическом держателе с габаритной высотой 1,4мм. Торцевые поверхности защищены экранами. На рис.3 приведен эскиз КПУ, на рис.4 – эскиз и внешний вид подогревателя.

Подогреватель представляет собой спираль из проволоки ВР-20 диаметром 0,0725мм, расположенную в керамическом корпусе. При его изготовлении также использовалась технология, описанная в [4]. Точность расположения выводов подогревателя составляет $\pm 0,1 \text{ мм}$. Разработанная технология изготовления подогревателя позволяет обеспечить серийное изготовление подогревателей с объемом выпуска до 2000шт в месяц.

На рис. 5 приведена фотография блока КПУ для многолучевой рентгеновской трубки. Блок КПУ представляет собой фланец с вакуумными выводами, на котором смонтированы 31 КПУ с управляющими электродами. Подогреватели КПУ соединены параллельно. Один из выводов подогревателя соединяется с корпусом рентгеновской трубки, другие общей шиной с накальным выводом. Управляющие электроды соединены каждый со своим выводом для возможности выравнивания тока каждого катода и управления созданием индивидуальных рентгеновских импульсов.

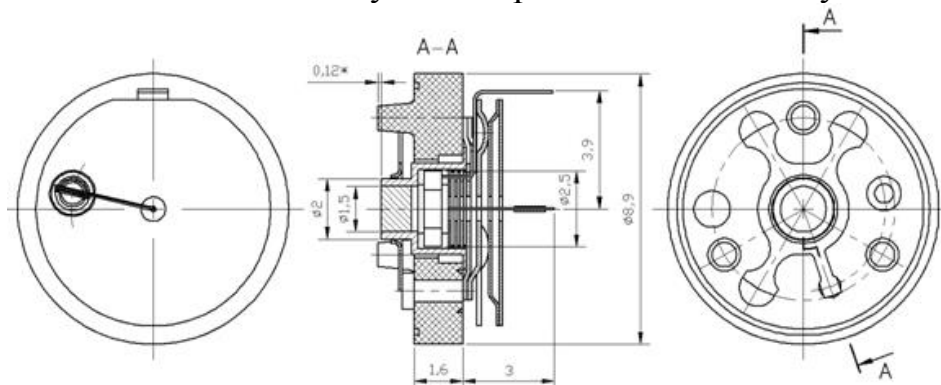


Рис. 3. КПУ для многолучевой рентгеновской трубки

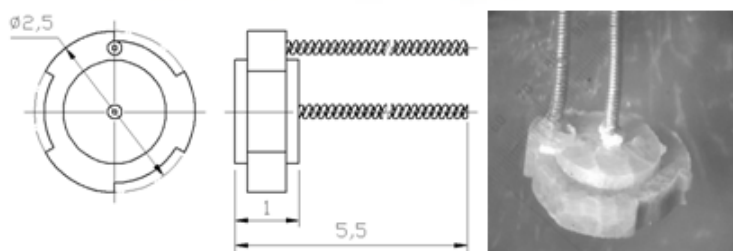


Рис. 4. Подогреватель



Рис. 5. Внешний вид блока КПУ

В табл.1 приведены данные пирометрирования отдельного КПУ. На рис.6 представлена пирометрическая кривая данного узла.

Таблица 1. Результаты пирометрирования КПУ

Катод Ø 2мм	Uн, В	1	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
	Iн, А	2	2,4	2,5	2,6	2,75	2,95	3,0	3,2	3,4	3,5
	Pн, Вт	2	3,6	4,0	4,5	5,5	6,5	7,2	8,3	9,5	10,5
	Tярк, С	544	756	807	866	940	1005	1051	1115	1170	1210
Катод Ø1,5мм	Uн, В	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8,1	
	Iн, А	0,6	0,62	0,66	0,71	0,76	0,8	0,84	0,88	0,94	
	Pн, Вт	2,4	2,8	3,3	3,9	4,6	5,2	5,9	6,6	7,6	
	Tярк, С	735	806	871	923	980	1035	1094	1138	1207	

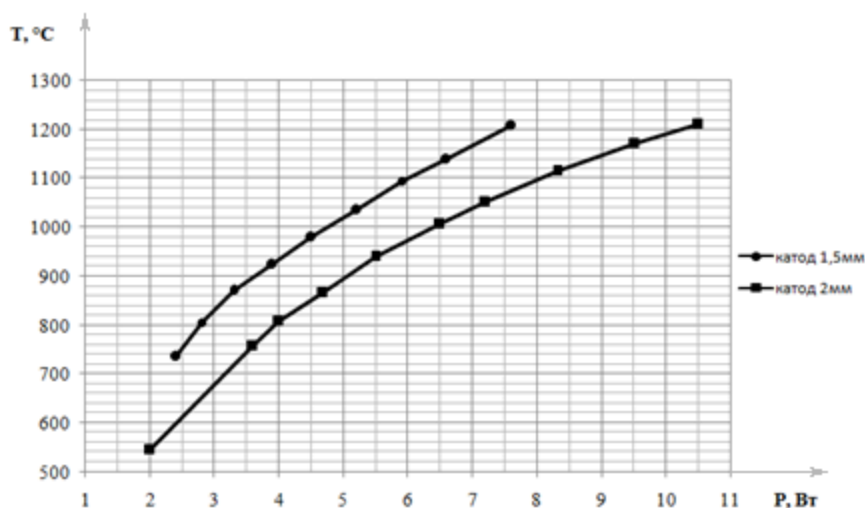


Рис. 6. Зависимости температуры эмиттера от мощности накала

Как видно из рис.6 разработанный КПУ в диапазоне рабочих температур имеет мощность накала 5-7 Вт. Для дальнейшего снижения мощности накала предлагается использовать перфорацию в керамике вокруг области наибольшего нагрева. По предварительным расчетам потери тепла за счет теплопроводности по керамике снизятся вдвое, обеспечивая мощность накала КПУ на уровне 2,5 Вт в рабочем диапазоне температур.

Выводы.

1. Разработаны металлопористые катоды для многолучевых рентгеновских трубок с диаметром эмиттера 2 мм и 1,5мм.

2. Разработана технология изготовления заплавленных оксидом алюминия подогревателей для катодов с диаметром эмитирующей поверхности $1 \div 4$ мм.

3. Проведены успешные испытания катодов в составе рентгеновских трубок.

Список литературы

[1] Каталог Маммография рентгеновские трубки, // URL: <http://www.rbmed.com> (дата обращения 10.09.2012).

[2] Рожкова Н.И., Решетцова Г.В., Запирова С.Б. О возможностях маммографического цифрового томосинтеза // Радиология-практика – 2008. – №6. – С.19–23.

[3] Кудинцева Г.А., Мельникова А.И., Морозов А.В., Никонов Б.П. Термоэлектронные катоды. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 368 с.

[4] А.А. Корнюхин, А.В. Крылов, О.Ю. Масленников, М.А. Токаев Катодно-подогревательный узел для многоручевой рентгеновской трубки // «Научные технологии» – 2015. – №7. – С.29–35.

Демидов Евгений Викторович – канд. экон. наук, генеральный директор ООО "Инновации". E-mail: btvp81@mail.ru

Корнюхин Андрей Александрович – начальник лаборатории ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов". E-mail: akornyukhin76@yandex.ru

Крылов Алексей Валерьевич – начальник отдела ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов". E-mail: alexeukrylov@inbox.ru

Токаев Мовлад Ахмедович – заместитель генерального директора по науке и инновационной деятельности Федеральное казенное предприятие "Казанский завод точного машиностроения". E-mail: kztm-msk@yandex.ru

Тун Тун Лин

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Интерес к кристаллографическим особенностям МСВ обусловлен широким использованием в спин-волновой электронике пленок железиттриевого граната (ЖИГ, $Y_3Fe_5O_{12}$), выращенных на монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$) [1 – 6]. В настоящей работе, построена и исследована модель, в которой кристаллографическая ориентация пленки кубического феррита является варьируемым параметром (рис. 1).

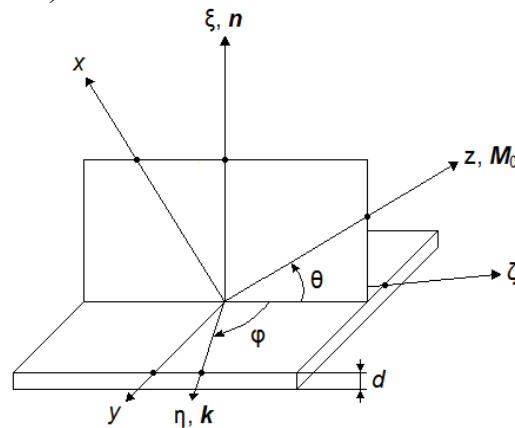


Рис.1. Системы координат, использованные в модели пленки

В системе xuz ось y параллельна плоскости пленки, а ось z направлена вдоль вектора равновесной намагниченности \mathbf{M}_0 . В системе $\xi\eta\zeta$ ось ζ направлена вдоль нормали к пленке \mathbf{n} , а ось η – вдоль волнового вектора МСВ \mathbf{k} . Решение системы, состоящей из уравнений Максвелла и уравнения движения намагниченности Ландау Лифшица, и учет электродинамических граничных условий приводит к следующим законам дисперсии МСВ [5]:

$$\tan \left[\frac{kd \sqrt{(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 - 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}}}{2\mu_{\xi\xi}} \right] = \frac{\sqrt{(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 - 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}}}{\mu_{\xi\eta}\mu_{\eta\xi} - \mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - 1}, \quad (1)$$

если $(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 \geq 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}$, и

$$\exp\left[\frac{kd\sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2}}{\mu_{\xi\xi}}\right] = \frac{\left[\sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2} - 2\right]^2 + (\mu_{\xi\eta} - \mu_{\eta\xi})^2}{\left[\sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2} + 2\right]^2 + (\mu_{\xi\eta} - \mu_{\eta\xi})^2} \quad (2)$$

при обратном неравенстве.

Тензор магнитной проницаемости имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu_{\xi\xi} &= \mu_x \cos^2 \theta + \sin^2 \theta, \\ \mu_{\eta\xi} &= \left[(1 - \mu_x) \sin \theta \cos \varphi + (\mu_s + i\mu_a) \sin \varphi \right] \cos \theta, \\ \mu_{\xi\eta} &= \left[(1 - \mu_x) \sin \theta \cos \varphi + (\mu_s - i\mu_a) \sin \varphi \right] \cos \theta, \\ \mu_{\eta\eta} &= (\mu_x \sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \cos^2 \varphi - \mu_s \sin 2\varphi \sin \theta + \mu_y \sin^2 \varphi. \end{aligned}$$

$$\mu_x = 1 + \frac{4\pi M_0 \omega_x}{\Omega}, \mu_y = 1 + \frac{4\pi M_0 \omega_y}{\Omega}, \mu_s = -\frac{4\pi M_0 \omega_s}{\Omega}, \mu_a = \frac{4\pi M_0}{\Omega} \left(\frac{f}{g} \right),$$

$$\omega_x = H_{in} + M_0 (N_{yy}^a - N_{zz}^a), \omega_y = H_{in} + M_0 (N_{xx}^a - N_{zz}^a), \omega_s = M_0 N_{xy}^a,$$

$$H_{in} = \frac{(\mathbf{H}_e \mathbf{M}_0) - 4\pi(\mathbf{M}_0 \mathbf{n})^2}{M_0}, \Omega = \omega_x \omega_y - \omega_s^2 - \left(\frac{f}{g} \right)^2.$$

Здесь $g = 2,8$ МГц/Э – гиромангнитное отношение; \mathbf{H}_e – напряженность намагничивающего поля; N_{ij}^a – компоненты тензора эффективных размагничивающих факторов анизотропии [6]; f – частота волны.

Анализ спектров основных типов МСВ основан на уравнениях (1), (2).

1. Перпендикулярно намагниченный слой, $\theta = \pi/2$, и можно совместить оси y и η , так что $\varphi = \pi/2$. Тогда $\mu_{\xi\xi} = 1$, $\mu_{\eta\xi} = \mu_{\xi\eta} = 0$ и дисперсионное уравнение (ДУ) примет вид [4]:

$$\tan(kd\sqrt{-\mu_{\eta\eta}}) = -\frac{2\sqrt{-\mu_{\eta\eta}}}{1 + \mu_{\eta\eta}},$$

$$\mu_{\eta\eta} = 1 + \frac{4\pi M_0 [H_{ez} - 4\pi M_0 + M_0 (N_{xx}^a - N_{zz}^a)]}{\left\{ [H_{ez} - 4\pi M_0 + M_0 (N_{xx}^a - N_{zz}^a)] [H_{ez} - 4\pi M_0 + M_0 (N_{yy}^a - N_{zz}^a)] - (M_0 N_{xy}^a)^2 - (f/g)^2 \right\}}.$$

Уравнение описывает моды прямых объемных МСВ. H_{ez} – проекция вектора напряженности внешнего намагничивающего поля на вектор намагниченности.

2. Касательно намагниченный слой, $\theta = 0$ и $\mathbf{k} \parallel \mathbf{M}_0$, так что $\varphi = 0$. Тогда $\mu_{\eta\eta} = 1$, $\mu_{\eta\xi} = \mu_{\xi\eta} = 0$ и ДУ имеет вид:

$$\tan \frac{kd}{\sqrt{-\mu_{\xi\xi}}} = \frac{2\sqrt{-\mu_{\xi\xi}}}{1 + \mu_{\xi\xi}},$$

$$\mu_{\xi\xi} = 1 + \frac{4\pi M_0 \left[H_{ez} + M_0 (N_{yy}^a - N_{zz}^a) \right]}{\left\{ \left[H_{ez} + M_0 (N_{xx}^a - N_{zz}^a) \right] \left[H_{ez} + M_0 (N_{yy}^a - N_{zz}^a) \right] - (M_0 N_{xy}^a)^2 - (f/g)^2 \right\}}.$$

Уравнение описывает моды обратных объемных волн.

3. Касательно намагниченный слой $\theta = 0$ и $\mathbf{k} \perp \mathbf{M}_0$, $\varphi = \pi/2$. Уравнения (1), (2) после всех подстановок и алгебраических преобразований примут следующий вид:

$$\tan \frac{kd \sqrt{(f_1^2 - f^2)(f^2 - f_2^2)}}{f^2 - f_0^2} = \frac{2\sqrt{(f_1^2 - f^2)(f^2 - f_2^2)}}{(4\pi M_0 g)^2 + f_1^2 + f_2^2 - 2f^2}$$

для объемных волн и

$$\exp \frac{2kd \sqrt{(f^2 - f_1^2)(f^2 - f_2^2)}}{f^2 - f_0^2} = 1 + \frac{4\sqrt{(f^2 - f_1^2)(f^2 - f_2^2)}}{(4\pi M_0 g)^2 - \left(\sqrt{f^2 - f_1^2} + \sqrt{f^2 - f_2^2} \right)^2}$$

для поверхностной (или смешанной при $N_{xy}^a \neq 0$) волны. Причем,

$$\begin{aligned} (f_0/g)^2 &= H_{ez}^2 + H_{ez} M_0 (N_{xx}^a + N_{yy}^a - 2N_{zz}^a + 4\pi) + \\ &+ M_0^2 \left[(N_{xx}^a - N_{zz}^a + 4\pi)(N_{yy}^a - N_{zz}^a) - (N_{xy}^a)^2 \right], \end{aligned}$$

$$f_{1,2}^2 = f_0^2 + 2\pi M_0^2 g^2 \left[(N_{xx}^a - N_{yy}^a) \pm \sqrt{(N_{xx}^a - N_{yy}^a)^2 + 4(N_{xy}^a)^2} \right].$$

Именно поверхностная МСВ представляет наибольший практический интерес. На рис. 2 приведен пример спектра, рассчитанного для значений $(f_0/4\pi M_0 g)^2 = 1$; $(f_1/f_0)^2 = 1,1$; $(f_2/f_0)^2 = 0,95$. ПМСВ, ПОМСВ и ООМСВ – соответственно поверхностная, прямые объемные и обратные объемные МСВ. В интервале $f_0 < f < f_1$ расположен спектр прямых объемных волн, а в интервале $f_2 < f < f_0$ спектр обратных объемных волн. Спектр поверхностной МСВ занимает частотный интервал

$$f_1 < f < f_\infty = g H_{ez} + 2\pi M_0 g + 0.5 g M_0 (N_{xx}^a + N_{yy}^a - 2N_{zz}^a),$$

а волновые векторы ограничены значениями

$$kd > k_{sv}d = \frac{2(f_1^2 - f_0^2)}{(4\pi M_0 g)^2 - (f_1^2 - f_2^2)}.$$

Причем, при $f = f_1$ и $k = k_{sv}$ дисперсионная зависимость главной моды прямой объемной волны плавно переходит в дисперсионную зависимость поверхностной волны.

Сравнительная оценка интервалов частот, занимаемых объемными волнами и поверхностной волной, выглядит следующим образом:

$$\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_\infty^2 - f_0^2} = \frac{16\pi\sqrt{(N_{xx}^a - N_{yy}^a)^2 + (2N_{xy}^a)^2}}{(4\pi + N_{xx}^a - N_{yy}^a)^2 + (2N_{xy}^a)^2}.$$

Из данного выражения следует, что в касательно намагниченных пленках слабоанизотропных ферритов, когда $|N_{ij}^a| \ll 1$, большую часть спектра МСВ с волновыми векторами перпендикулярными намагниченности будет занимать волна поверхностного типа.

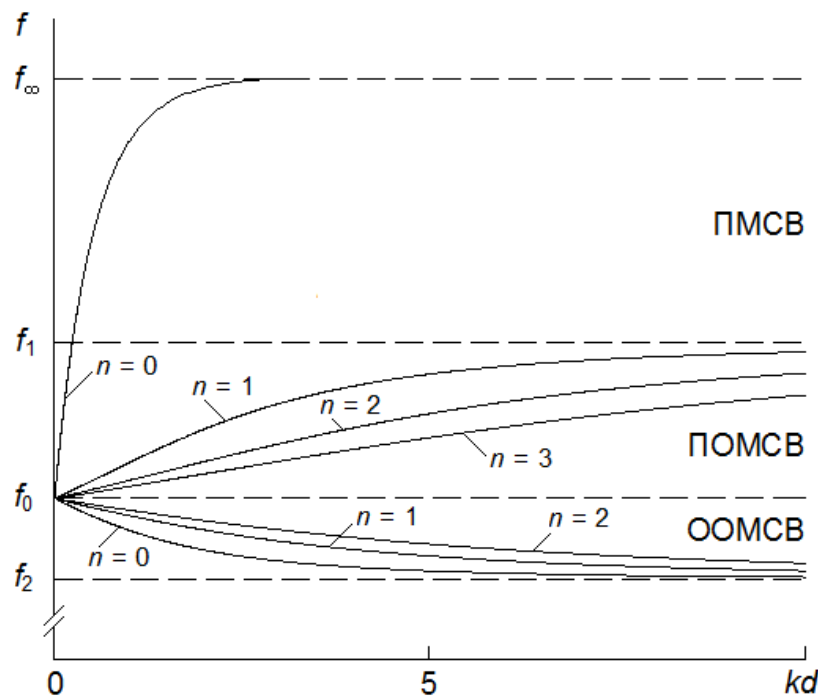


Рис.2. Спектр магнито-статических волн в касательно намагниченной пленке и с волновым вектором, перпендикулярным вектору намагниченности (n – номер моды МСВ объемного типа)

Отметим в связи с рассматриваемой задачей, что в настоящее время в спин-волновых устройствах наиболее широко применяются пленки ЖИГ с кристаллографической ориентацией типа $\{111\}$. Однако термостабильность спектров ПМСВ в пленках ЖИГ с ориентациями типа $\{110\}$ и $\{100\}$ оказы-

вается более высокой, чем в пленках $\{111\}$. Была построена модель, позволяющая выполнять расчеты для пленок, ориентированных вдоль любой из кристаллографических плоскостей, проходящих через ось типа $\langle 110 \rangle$. Тогда, например, все три упомянутые ориентации $\{111\}$, $\{110\}$, $\{100\}$ становятся частными случаями такой модели. Геометрические аспекты поставленной задачи изображены на рис. 3.

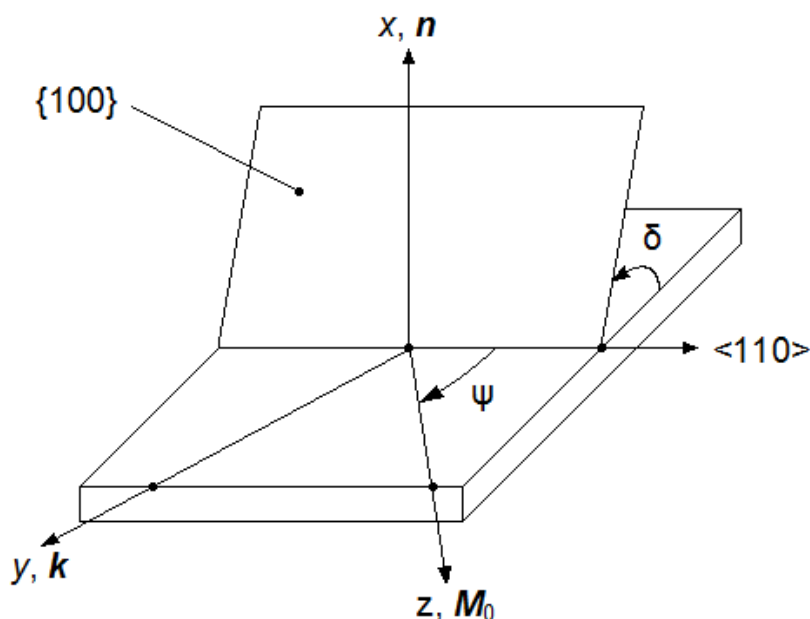


Рис.3. Модель пленки кубического феррита

Компоненты тензора эффективных размагничивающих факторов анизотропии данной модели описываются выражениями:

$$M_0 N_{xx}^{a(1)} = -2 \frac{K_1^c}{M_0} \left\{ 1 - \frac{1 + 3 \cos 2\delta}{16} [(1 + 3 \cos 2\delta) + 3(1 - \cos 2\delta) \cos 2\psi] \right\},$$

$$M_0 N_{yy}^{a(1)} = -\frac{K_1^c}{M_0} \left\{ 1 + \frac{1 + 3 \cos 2\delta}{32} [(1 + 3 \cos 2\delta) + 3(5 - \cos 2\delta) \cos 4\psi] \right\},$$

$$M_0 N_{zz}^{a(1)} = -\frac{K_1^c}{M_0} \left\{ 1 + \frac{1 + 3 \cos 2\delta}{32} \left[(1 + 3 \cos 2\delta) + 4(1 - \cos 2\delta) \cos 2\psi - \right. \right. \\ \left. \left. - (5 - \cos 2\delta) \cos 4\psi \right] \right\},$$

$$M_0 N_{xy}^{a(1)} = \frac{3}{2} \frac{K_1^c}{M_0} \sin 2\delta \left[\cos 3\psi + \frac{1 + 3 \cos 2\delta}{8} (\cos \psi - \cos 3\psi) \right].$$

K_1^c – первая константа кубической магнитной анизотропии.

В случае пленок с ориентацией типа $\{111\}$ необходим учет не только первой, но второй константы магнитной кубической анизотропии [3]. Вывод выражений для компонент тензора эффективных размагничивающих факторов, соответствующих учету второй константы (K_2^c), приводит к следующим формулам [5]:

$$M_0 N_{xx}^{a(2)} = \frac{K_2^c}{6M_0}, \quad M_0 N_{yy}^{a(2)} = \frac{K_2^c}{18M_0} (1 + 5 \cos 6\psi),$$

$$M_0 N_{zz}^{a(2)} = \frac{K_2^c}{18M_0} (1 - \cos 6\psi), \quad M_0 N_{xy}^{a(2)} = \frac{\sqrt{2}}{6} \frac{K_2^c}{M_0} \cos 3\psi.$$

Результаты работы могут быть использованы при разработке устройств спин-волновой электроники. Выведены и проанализированы законы дисперсии МСВ в ферритовых пленках. Показано, что учет кристаллографической магнитной анизотропии феррита приводит к появлению в спектрах МСВ дополнительных дисперсионных зависимостей, отсутствующих в изотропных моделях. Детально исследован спектр поверхностной МСВ в касательно намагниченных пленках. Установлено, что наибольшая анизотропия спектра присуща пленкам с ориентациями типа $\{110\}$ и $\{100\}$, а наименьшая – типа $\{111\}$.

Список литературы

- [1] Гласс Х.Л. // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76, № 2. – С. 64.
- [2] Берегов А.С., Кудинов Е.В. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 6(390). – С. 41.
- [3] Чивилева О.А., Гуревич А.Г., Эмирян Л.М. // ФТТ. – 1987. – Т. 29, № 1. – С. 110.
- [4] Шагаев В.В. // ФТТ. – 1998. – Т.40, № 11. – С. 2089.
- [5] Шагаев В.В. // ЖТФ. – 2004. – Т.74, № 10. – С. 108
- [6] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. – М.: Наука, 1994, 464 с.

Тун Тун Лин – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tuntunlinn50@gmail.com

П.В. Кондрашов, В.С. Кулагин, В.В. Андреев

МЕТОД И УСТАНОВКА МНОГОУРОВНЕВОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ МДП-СТРУКТУР

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В данной работе для исследования процессов деградации и модификации тонких и сверхтонких диэлектрических пленок МДП-структур предложен новый метод многоуровневой токовой нагрузки. Этот метод позволяет исследовать процессы деградации и модификации МДП-структур при воздействии радиационных облучений, сильных электрических полей, плазменных обработок, инъекции горячих носителей и других стрессовых воздействий. Метод также дает возможность контролировать дефектность тонких пленок подзатворного диэлектрика МДП-приборов и влияние на нее внешних факторов.

В отличие от стандартных методов исследования подзатворного диэлектрика, таких как метод постоянного тока и J-Ramp метод [1,2], в разработанном методе к МДП-структуре прикладывается специальный алгоритм токового воздействия, а характеристики диэлектрика контролируются по анализу временной зависимости напряжения, падающего на образце. При этом учитываются процессы заряда и разряда емкости МДП-структуры, а также захвата заряда в подзатворном диэлектрике. Заряд и разряд емкости МДП-структуры постоянной плотностью тока от режима инверсии до режима аккумуляции или наоборот позволяет получать низкочастотную $C-V$ зависимость [3,4]. Учет процессов заряда емкости МДП-структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инъекционном режиме дает возможность существенно повысить метрологические характеристики метода и уменьшить погрешности, возникающие при определении характеристик МДП-структур. Разработаны модели, описывающие изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме инъекции носителей заряда. Использование этих моделей позволяет выбрать оптимальный алгоритм токового воздействия и повысить точность измерений.

На рис. 1 представлены временные зависимости многоуровневой токовой нагрузки (а), напряжения (V_1), падающего на МДП-структуре (б), емкостного (I_c) и инъекционного (I_{inj}) токов (с), используемые в предлагаемом методе. На первом этапе (рис.1, участок 1) МДП-структуру заряжают импульсом постоянного тока, переводя ее в режим аккумуляции или глубокой инверсии. Затем изменяют полярность тока (рис.1, участок 2). Поскольку процесс заряда емкости осуществляется постоянным током, то с учетом уравнения нейтральности заряда временная зависимость емкости МДП-структуры на этом участке для диэлектрических пленок, в которых отсутствует прямое туннелирование носителей заряда, оказывается обратно пропорциональна производной $dV_1(t)/dt$ [3,4].

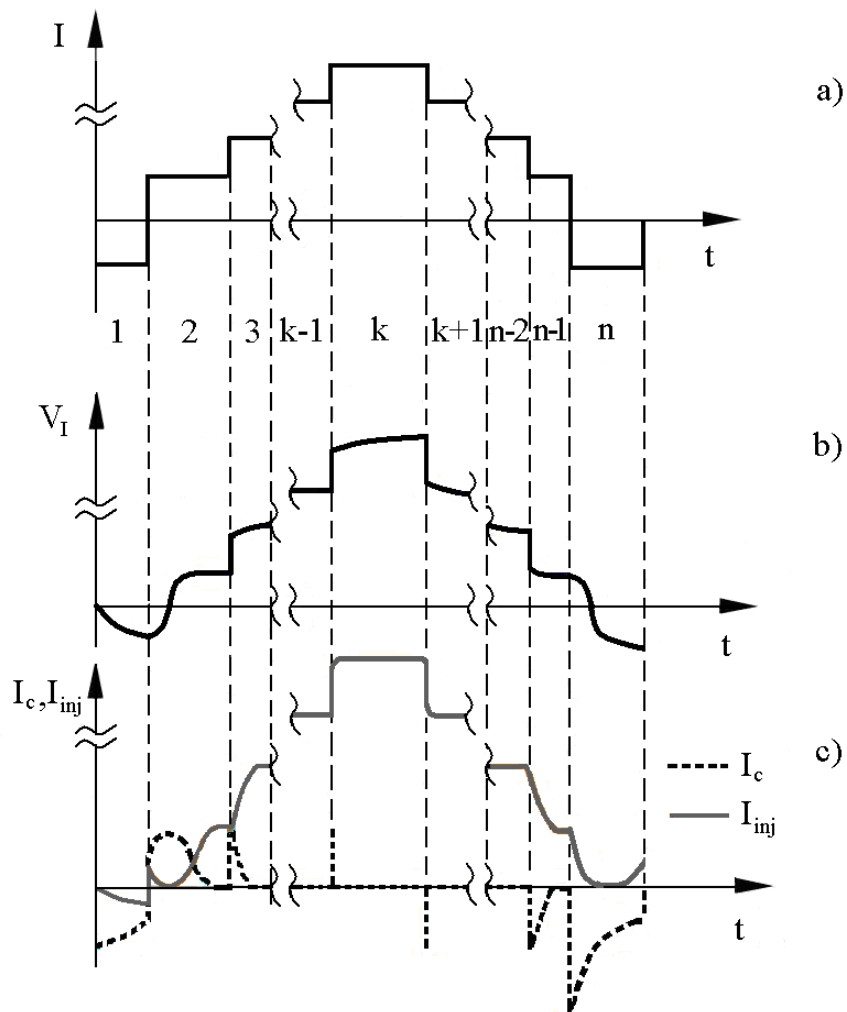


Рис. 1. Временные зависимости токовой нагрузки (а), напряжения на МДП-структуре (б), емкостного и инжекционного тока (с)

Определив временную зависимость емкости МДП-структуры $C(t)$ и учитывая зависимость $V_I(t)$, получаем C - V кривую, которая будет являться низкочастотной C - V зависимостью. Требования к амплитуде импульса тока на участке 2 аналогичны требованиям к амплитуде емкостного тока в квазистатическом C - V методе. Для ультратонких диэлектрических пленок, в которых возникает прямое туннелирование носителей заряда через трапециидальный потенциальный барьер [4], в уравнении нейтральности заряда необходимо учитывать плотность инжектированного заряда Q_{inj} , обусловленную туннельным током. Величина заряда Q_{inj} получается расчетным путем для конкретной исследуемой диэлектрической пленки.

Учитывая, что $V_I(t)$ функционально связана с поверхностным потенциалом, то при заряде МДП-структуры постоянным током (рис.1, участок 2) временная зависимость поверхностного потенциала $\phi_s(t)$ может быть определена из временной зависимости $V_I(t)$ [3], а для ультратонких диэлектрических пленок при определении $\phi_s(t)$ необходимо учитывать эффект протекания туннельного тока. Рассматривая совместно $\phi_s(t)$ и $V_I(t)$, полу-

чаем зависимость $\varphi_s(V_I)$. В результате, используя предложенный метод, можно определить зависимости: низкочастотной емкости МДП-структуры от смещающего напряжения, поверхностного потенциала от напряжения и плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала, традиционно получаемые с использованием низкочастотного C-V метода.

Для исследования электронных процессов, протекающих в подзатворном диэлектрике МДП-структуры и на границах раздела в широком диапазоне сильных электрических полей, а также для уменьшения времени тестирования, осуществляют ступенчатое увеличение амплитуды токового воздействия (рис.1, участки 3,...,k-1,k; где k - номер участка, на котором производится основная инжекция заряда в подзатворный диэлектрик). При каждом переключении токовой нагрузки (рис. 1, а), также возникает емкостной ток (рис. 1, с), следовательно, учет процесса заряда емкости МДП-структуры на всем протяжении испытания позволяет повысить точность определения величины инжектированного заряда и корректнее анализировать электронные процессы, протекающие в диэлектрической пленке.

При контроле дефектности подзатворного диэлектрика, на k-том участка МДП-структура выдерживается вплоть до пробоя образца и измеряется величина заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя Q_{bd} . По результатам статистических измерений Q_{bd} , выполненных на различных МДП-структурах, оценивается дефектность подзатворного диэлектрика [1,2,4].

Для реализации предложенного метода была разработана специальная экспериментальная установка, состоящая из устройства подключения МДП-структуры и блока измерения, состоящего из источника тока и узла коммутации токозадающих резисторов. Для работы узла измерения необходимо опорное напряжение, которое формирует ЦАП. Управление узлом коммутации осуществляется автоматически, с помощью цифрового блока. Также в установке присутствует АЦП, передающий выходные данные на компьютер.

Разработанная установка обладает следующими основными характеристиками:

- Диапазон подаваемых напряжений: $\pm (1 \div 45)$ В
- Диапазон токов: $(10^{-5} \div 10^{-9})$ А
- Количество поддиапазонов измерения: 5
- Напряжение питания: ± 50 В
- Потребляемая мощность: не более 2 Вт
- Габариты установки: 175x125x90 мм

Таким образом, в данной работе предложен новый метод многоуровневой токовой нагрузки и разработана автоматизированная установка для его реализации, что позволяет проводить комплексное исследование МДП-структур и приборов на их основе при различных стрессовых воздействиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Список литературы

[1] JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the Wafer–Level Testing of Thin Dielectrics. 2001.

[2] Strong A., Wu E., Vollertsen R., Sune J., Rosa G., Rauch S., Sullivan T. Reliability Wearout Mechanisms in Advanced CMOS Technologies. IEEE Press Series on Microelectronic Systems. Wiley, 2009. 624 p.

[3] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2012. V. 41. P. 012017.

[4] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Loskutov S.A., Stolyarov A.A. The method of the MIS structure interface analysis// Surface and Interface Analysis. 1999. V. 28. P.142-145.

Кондрашов Павел Вячеславович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: p.kondrashov.radio@yandex.ru

Кулагин Владислав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kulagin.vladislav@mail.ru.

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

А.А. Корнюхин, О.Ю.Масленников, В.П.Марин, М.А.Токаев

МНОГОЭМИТТЕРНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРУБКИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов"
Московский институт радиоэлектроники и автоматики
Федеральное казенное предприятие "Казанский завод точного
машиностроения"

В существующих установках, реализующих процессы компьютерной томографии (КТ) используются однолучевые рентгеновские трубки, вращающиеся вокруг исследуемого объекта [1]. В случае их использования в маммографических установках, реализующих томографическую функцию необходимость длительной выдержки в каждой позиции (из-за малой энергии рентгеновских лучей не более 40 КЭВ) приводит к необходимости механической фиксации положения трубки под разными углами к объекту обследования, что увеличивает время обследования и создает значительные неудобства для пациентов. Использование многоэмиттерных рентгеновских трубок (МЭРТ) позволяет существенно, упростить КТ аппараты одновременно увеличив их надежность и уменьшив время анализа и дозу рентгеновского излучения, получаемую пациентом[2].

Для получения трехмерного образа объекта требуется его вращение, либо синхронное вращение комбинации источника рентгеновского излучения и детекторов. Современные томографы включают в себя один источник рентгена, который вращается вокруг объекта. Режим работы, используемый в маммографии для обследования молочной железы, отличается от режимов анализа других объектов (как биологических, так и не биологических), прежде всего большим временем экспозиции, необходимым для получения снимка. Время экспозиции, для получения качественного рентгеновского снимка, должно составлять не менее 0,1 сек. За время 0,1 сек источник рентгеновского излучения успевает пройти расстояние порядка одного сантиметра. Поэтому изображение получается смазанным и непригодным для использования.

Размазывание изображения можно убрать, сделав источник рентгеновского излучения неподвижным. Но при этом, как отмечалось выше, необходимо преодолеть вибрации трубки и т.п. Чтобы получить 3D изображение и избежать при этом вращения сложного высоковольтного прибора вокруг объекта изучения, нами было предложено использовать ряд рентгеновских источников, расположенных с фиксированным шагом вокруг исследуемого объекта и включаемых по очереди. Отдельная рентгеновская трубка может

включать несколько десятков катодно-сеточных модулей, расположенных с определенным шагом вдоль одной линии. При проведении обследования источники рентгеновского излучения включаются по очереди, и каждый из них работает в течение времени экспозиции, достаточного для получения качественного рентгеновского снимка. Далее на компьютере проводится обработка полученных рентгеновских снимков с целью получения трехмерного образа объекта, либо посрезовых его изображений.

Схема построения МЭРТ показана на рис. 1. Технические параметры МЭРТ с вращающимся анодом, фотография трубки представлены в табл. 1 и на рис. 1.

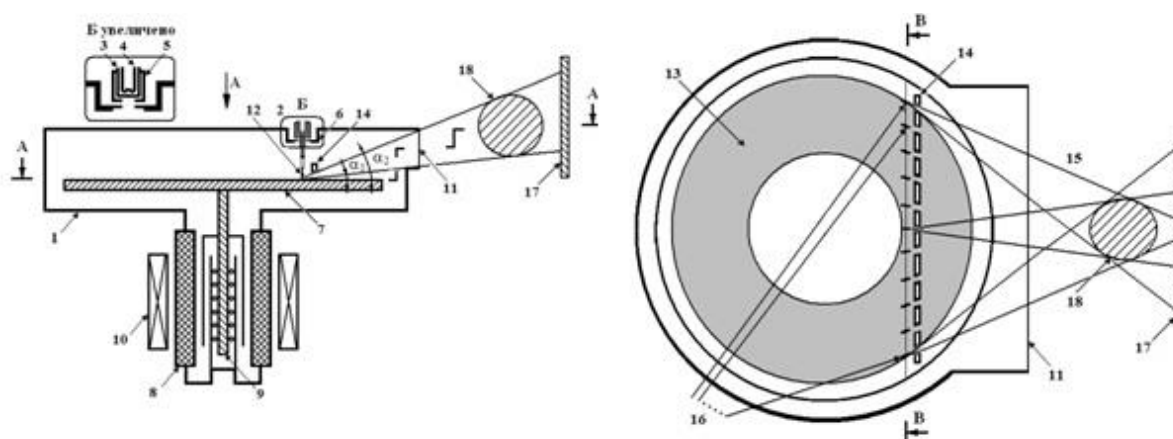


Рис. 1. Схема рентгеновского излучателя с анодом в форме тонкого диска большого диаметра

Таблица 1. Технические характеристики многоэмиттерной рентгеновской трубки с вращающимся анодом.

Наименование параметра	Единица измерения	Диапазон допустимых значений	
		Режим 1	Режим 2
Импульсный ток анода	мА	100, не более	20, не более
Рабочее напряжение на аноде, регулируемое	кВ	От 20 до 40	
Управляющее напряжение на катодах	В	500, не более	
Напряжение накала катодов	В	8, не более	
Материал анода		Молибден, вольфрам	
Длина катодной линейки	мм	50, не менее	
Количество катодов в линейке	шт.	15, не менее	
Управление катодами		независимое	
Ресурс излучателя	ч.	25 000, не менее	
Максимальная выходная мощность питающего устройства	кВт	4	

На рис. 2 (а,б) представлены фотографии рентгеновской трубки с вращающимся анодом. Технические параметры МЭРТ с неподвижным анодом представлены в табл. 2.



Рис. 2а. Внешний вид рентгеновской трубки со стороны накальных выводов многоэмиттерного катодного узла

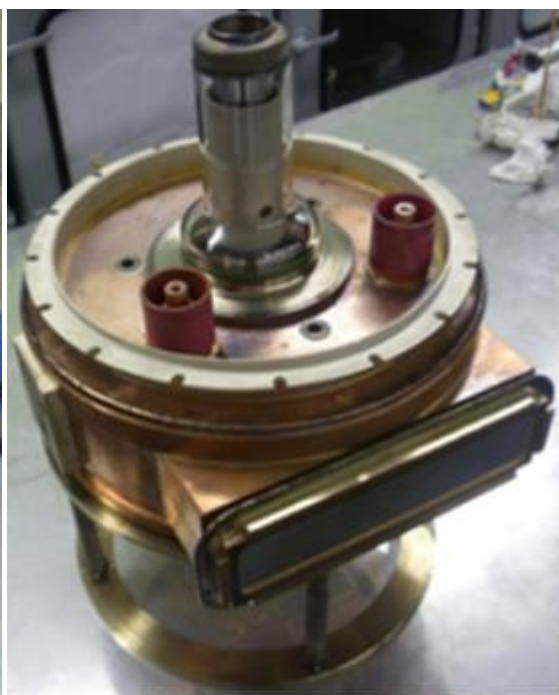


Рис. 2б. Внешний вид рентгеновской трубки со стороны высокоскоростного ввода вращения анода

Таблица 2. Технические характеристики многоэмиттерной рентгеновской трубки с неподвижным анодом

Наименование параметра	Единица измерения	Диапазон допустимых значений	
		Режим 1	Режим 2
Импульсный ток анода	мА	10, не более	2, не более
Рабочее напряжение на аноде, регулируемое	кВ	От 20 до 40	
Управляющее напряжение на катодах	В	500, не более	
Напряжение накала катодов	В	8, не более	
Общий ток накала катодов	А	20, не более	
Длительность импульса работы отдельного катода	с	От 0,1 до 3,0	
Материал анода		Молибден, вольфрам	
Длина катодной линейки	мм	300, не менее	
Количество катодов в линейке	шт.	29, не менее	
Управление катодами		независимое	
Ресурс излучателя	ч.	25 000, не менее	
Максимальная выходная мощность питающего устройства	кВт	4	

Внешний вид трубки показан на рисунке 3.



Рис. 3. Рентгеновская трубка с неподвижным анодом



Рис. 4. Выводное бериллиевое окно с апертурой 320x30мм

Использование МЭРТ с неподвижным катодом стало возможным в результате применения более чувствительных детекторов, позволивших уменьшить токоотбор с катодов на порядок.

Конструкция МЭРТ для маммографии имеет следующие отличительные особенности.

1. Использование оригинальных высокоэффективных металлопористых катодов обеспечивает необходимый ресурс, требуемую оптику, малую мощность накала. Технологии катода и подогревателя были разработаны и реализованы в ходе выполнения работы [3].

2. Использование оригинальной электронной оптики, формирующей из круглого электронного потока, эмитируемого катодом, пучка эллиптической формы нужных размеров.

3. Использование оригинального неподвижного коллиматора, расположенного внутри МЭРТ.

4. Использование бериллиевых окон больших размеров.

5. Использование геттерных насосов для высокого вакуума.

Испытания обоих вариантов МЭРТ проводились специалистами ЗАО «МТЛ» - ведущего Российского производителя маммографов, в специально разработанных макетах маммографов [4] показали, что использование МЭРТ позволяет:

- обеспечить увеличение точности диагностирования появления болезнетворных изменений в молочной железе на ранних стадиях;
- сократить время проведения анализа в несколько раз и на порядок уменьшить дозу облучения.

Расположив МЭРТ вокруг объекта, мы имеем возможность обеспечить движение рентгеновского пятна вокруг объекта практически с любой скоростью. Такое построение КТ-томографа обеспечивает:

- фиксированность расположения рентгеновских источников;
- огромную теплоемкость анода, позволяющую увеличить среднюю мощность (в том числе благодаря возможности принудительного воздушного охлаждения анодов);
- возможность снижения длительности импульса за счет увеличения импульсной мощности.

Оценки показывают, что в существующих КТ за время одного оборота осуществляется 100÷200 рентгеновских импульсов длительностью ~1 мсек и скважностью 3÷5. Таким образом, необходимо шесть 31-эмиттерных МЭРТ расположенных по периферии.

С учетом того, что каждая МЭРТ облучает только свой участок детекторов, «эффективное» время оборота рентгеновского луча, может быть сделано ~10 мсек, что в 3 раза меньше лучших результатов до настоящего времени.

Выводы. Разработаны и успешно испытаны 2 варианта многоэмиттерных рентгеновских трубок для маммографии.

1. Решены проблемы создания высокоэффективных металлопористых катодов, крупногабаритных бериллиевых окон обеспечения низковольтного управления, высокого вакуума в МЭРТ.

2. Проведены испытания МЭРТ в макетах маммографов показана эффективность использования МЭРТ.

3. Предложен вариант использования МЭРТ для реализации КТ томографии пятого поколения, позволяющей существенно улучшить эксплуатационные качества КТ-томографов.

Список литературы

[1] Каталог Маммография рентгеновские трубки, // URL: <http://www.rbmed.com> (дата обращения 10.09.2012).

[2] Рожкова Н.И., Решетцова Г.В., Запирова С.Б. О возможностях маммографического цифрового томосинтеза // Радиология-практика – 2008. – №6. – С.19–23.

[3] А.А. Корнюхин, А.В. Крылов, О.Ю. Масленников, М.А. Токаев Катодно-подогревательный узел для многолучевой рентгеновской трубки // «Научные технологии» – 2015. – №7. – С.29–35.

[4] Ворожейкин А.А., И.А. Гузилов, Е.В. Демидов, А.А. Корнюхин, А.В. Красиков, А.В. Крылов, О.Ю. Масленников, М.А. Токаев Экспериментальное исследование многолучевой рентгеновской трубки для 3D-маммографии // «Научные технологии» – 2016. – №10. – С.30–35.

Корнюхин Андрей Александрович – начальник лаборатории ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов". E-mail: akornyuukhin76@yandex.ru

Масленников Олег Юрьевич – д-р техн. наук, генеральный директор ООО "Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов". E-mail: maslennikov_o@mail.ru

Марин Владимир Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры МИС, Московский институт радиоэлектроники и автоматики. E-mail: maslennikov_o@mail.ru

Токаев Мовлад Ахмедович – заместитель генерального директора по науке и инновационной деятельности, Федеральное казенное предприятие "Казанский завод точного машиностроения". E-mail: kztm-msk@yandex.ru

В.В. Андреев, С.В. Рыжов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДИОДОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время актуальным является создание быстродействующих диодов, широко применяемых в различной электроаппаратуре, в том числе и микросборках. Широкое применение данного типа диодов связано со способностью быстро изменять свое рабочее состояние [1]. Для выбора оптимальной конструкции изделия обычно прибегают к моделированию технологии изготовления [2,3,4]. В процессе изготовления подобных приборов применяется диффузия золота. Данная технологическая операция позволяет уменьшить скорость обратного восстановления, но при этом снижает крутизну вольт–амперной характеристики (ВАХ) диода.

В данной работе было проведено моделирование технологического процесса изготовления диодов в TCAD без учета изменения ВАХ диода в результате легирования золотом, которое определяется на практике для конкретного типа диода.

Технологическая модель диода была построена с использованием TCAD, в котором выполняется моделирование технологических операций на геометрическом уровне [4]. Моделируемая структура диода, показана на рисунке 1. Для моделирования структуры была выполнена оптимизация параметров модели для типового технологического процессу с формированием областей диода ионным легированием.

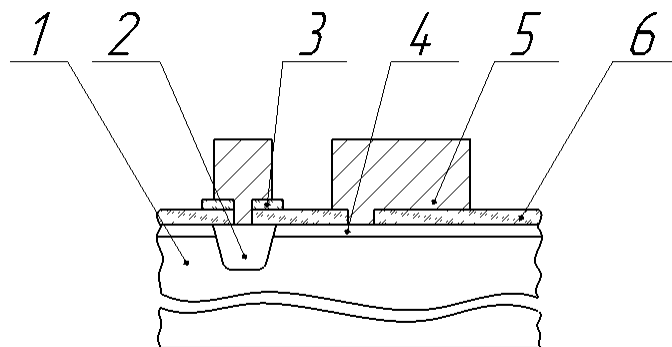


Рис. 1. Структура диода: 1–подложка-анод (p–типа); 2–области катода (n–типа); 3 – нитрид кремния; 4 – области подлегирования анода (p+–типа); 5–металлизация; 6–диоксид кремния

Для получения ВАХ диода в TCAD генерируется расчетная сетка, используемая для решения системы из четырех уравнений, включающих уравнение Пуассона, уравнение непрерывности для электронов и дырок, а также уравнение переноса энергии для электронов в узлах расчетной сетки [4].

Показанная на рисунке 1 область подлегирования, служит для предотвращения инверсии приповерхностного слоя полупроводника, а также позволяет уменьшить боковую диффузию области катода и создать внутреннее электрическое поле, которое препятствует потоку электронов к поверхности кремния [5]. Применение подобной области позволяет увеличить крутизну ВАХ диода, но при этом значительно снижается напряжение пробоя. В данной работе исследуется влияние области подлегирования на пробивные напряжения. На рисунке 2 приведен вид распределения напряженности электрического поля по структуре в системе TCAD.

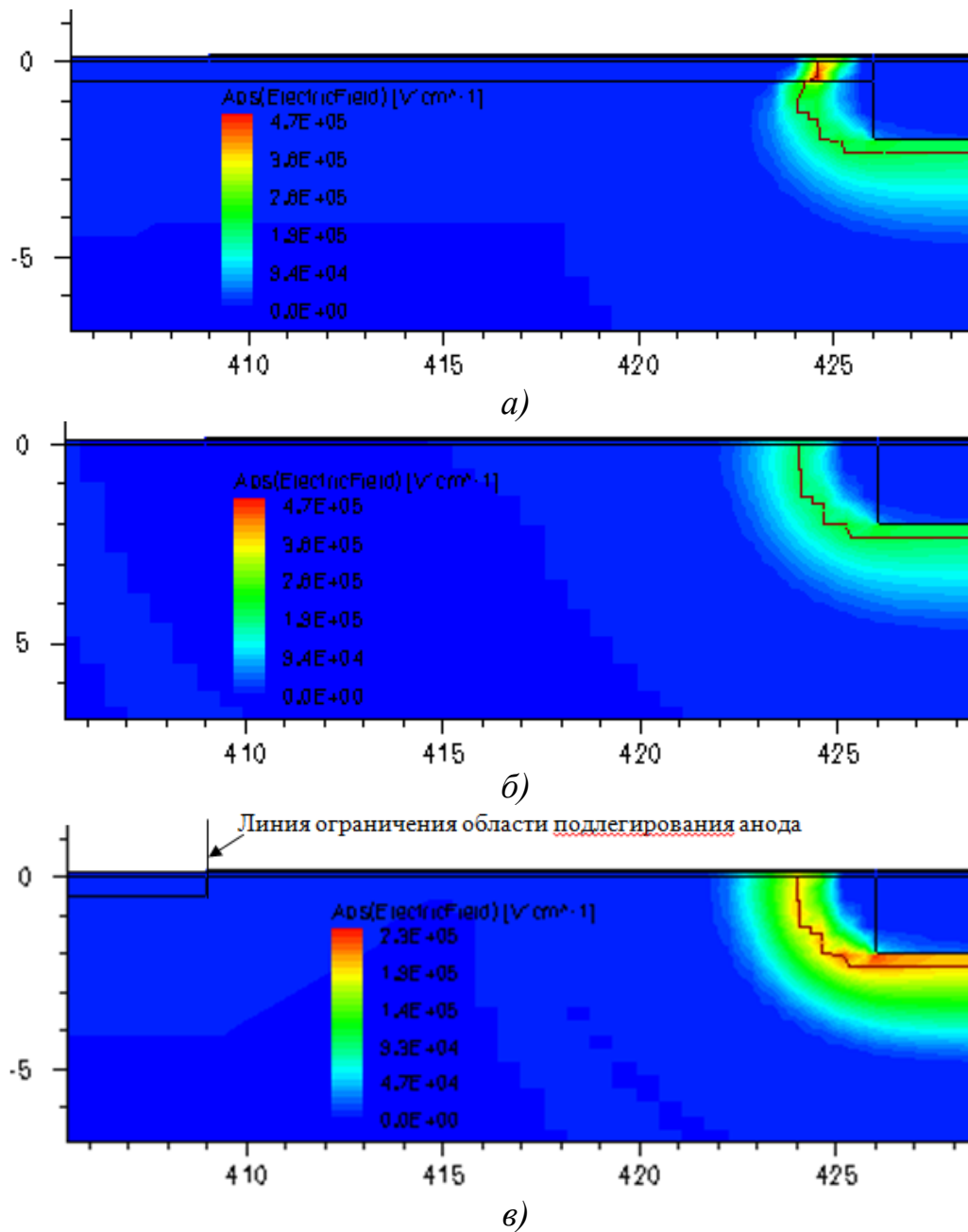


Рис. 2. Влияние области подлегирования анода на пробивное напряжение:
 а) не ограниченная область подлегирования; б) без подлегирования;
 в) ограниченная область подлегирования

Как видно из рисунка 2 использование области подлегирования анода (рисунок 2а) приведет к заниженному значению напряжения пробоя по сравнению со структурой на рисунке 2б. Это происходит из-за искривления области пространственного заряда в месте примыкания подлегирования p^+ к аноду в приповерхностной области – рисунок 2а.

Компромиссным вариантом конструкции подлегирования p^+ является ограничение его области (рисунок 2в), что позволит, повысить пробивное напряжение по сравнению со структурой с областью подлегирования без ограничения. Пробивное напряжения для структуры без подлегирования составляет 35 В, с подлегированием – 15 В, с ограниченной областью подлегирования – 25 В.

На основе математической модели проведено исследование влияния объемного сопротивления исходной подложки на наклон ВАХ, конструкции, изображенной на рисунке 2в. Результаты приведены на рисунке 3.

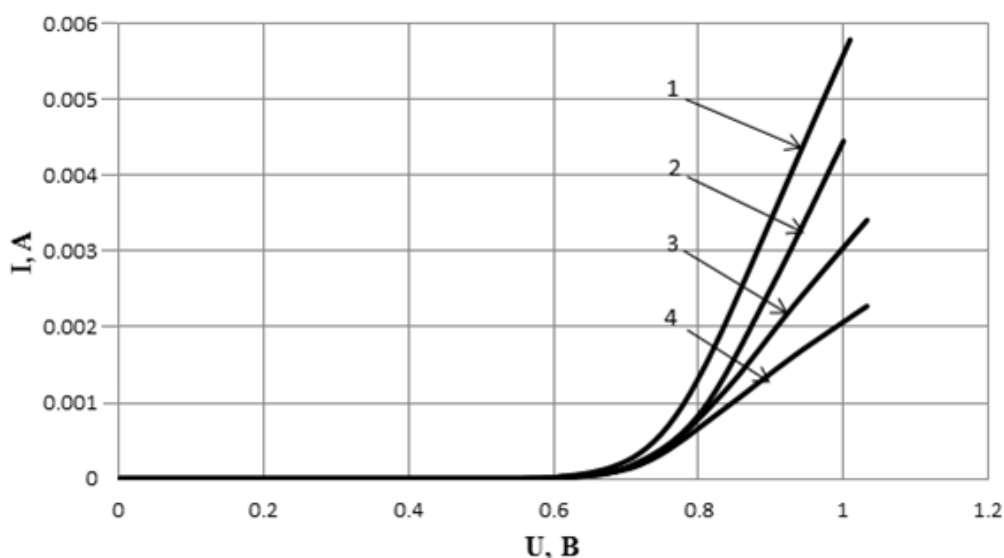


Рис. 3. Влияние объемного сопротивления структуры на наклон ВАХ:
1– КДБ – 0,1; 2– КДБ–0,5; 3– КДБ–1; 4–КДБ–2

Выводы

В результате выполнения работы была признана оптимальной конструкция диода по типу, представленному на рисунок 2в. Двумерная технологическая модель такого диода, полученная в результате TCAD–моделирования, показана на рисунке 4.



Рис. 4. Двумерная технологическая модель диода

Результаты исследования в данной работе были использованы на предприятии АО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга) для выбора конструкции и исходного материала подложки при разработке быстродействующего диода.

Список литературы

[1] Sze S., M, Lee M. K. Semiconductor Devices. Physics and Technology // John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 3rd ed., 2013, 582 p.

[2] Simon L., Yue F. 3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics // Springer, 2012, 292p.

[3] Yue Fu, Zhanming Li, Wai Tung Ng, Johnny K.O. Sin. Integrated Power Devices and TCAD Simulation (Devices, Circuits, and Systems) // CRC Press, 2014, 389p.

[4] Окунев А. Ю. Моделирование диодной структуры в среде TCAD [Электронный ресурс]. Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края, 2014. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html> (дата обращения 26.03.17).

[5] Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Часть 2 URL: <http://www.iprbookshop.ru/12271> (дата обращения 26.03.17).

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Рыжов Сергей Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sergey.righov@gmail.com

Аунг Пьей Зон, А.В. Мазин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ЭКСПРЕССНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ ПЛАСТИН И ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Повышение удельной мощности силовых полупроводниковых устройств связано с применением материалов, обладающих высокой теплопроводностью и разработкой методов измерения их параметров. На эффективность электронных устройств существенное влияние оказывают не только параметры полупроводникового вещества, но также условия теплообмена и другие факторы. Поэтому важным фактором, необходимым для развития полупроводниковой электроники, является разработка методики и устройств для оперативного контроля характеристик теплоотводящих элементов.

Целью нашей работы являлось определение возможности разработки экспрессного метода контроля теплопроводности тонких пластин и его реализации на базе элементов Пельтье, обладающих малой инерционностью и легкостью встраивания в измерительную систему.

Решение задачи заключается в закреплении полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) устройств Пельтье на их корпусных деталях при условии максимального теплообмена.

Теплообмен в поставленной задаче определяется в первую очередь теплопроводностью самого контактного материала. Применение синтерингового материала было бы хорошим вариантом с точки зрения теплопроводности, однако это противоречит основному принципу построения полупроводниковых приборов, который требует минимизировать передачу упругих напряжений от основания прибора к его полупроводниковой структуре [1]. Известно, что при воздействии значительных упругих напряжений может наблюдаться инверсия проводимости полупроводника [2], что ведет к катастрофическим последствиям с позиции его функционирования. По этой причине мы решили рассмотреть исследуемую систему с механической позиции.

Рассмотрим плоскую задачу о деформировании ПЧЭ, зафиксированного на основании с помощью контактного материала.

На рисунке 1 приведена расчетная схема этой задачи. Требуется определить коэффициент передачи деформации K от основания к ПЧЭ

($K = \varepsilon_p / \varepsilon_o$, где ε_p - средняя деформация по длине ПЧЭ, ε_o - деформация на поверхности основания) при следующих граничных условиях:

– деформация на поверхности основания постоянна и равна ε_o ;

- деформация ε_x по высоте кристалла постоянна, так как $H/2L \leq 1$;
- материалы основания, контактного материала и ПЧЭ предполагаются упругими, а материал ПЧЭ – изотропным, для выбранной кристаллографической ориентации) со следующими параметрами: ПЧЭ – модуль упругости Юнга E_n и коэффициент Пуассона ν_n ; контактный материал – модуль упругости Юнга E_K и коэффициент Пуассона ν_K ; основание – модуль упругости Юнга E и коэффициент Пуассона ν .

Если поле перемещений в адгезиве вдоль осей X и Y представить в виде

$$\left. \begin{aligned} U_k &= xf(y) \\ \nu_k &= c = const \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

то поле деформаций в слое связующего будет

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^k &= \frac{\partial U_k}{\partial x} = f(y); \varepsilon_y^k = \frac{\partial \nu_k}{\partial y} = 0 \\ \gamma_{xy}^k &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \nu}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \times \frac{\partial f}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

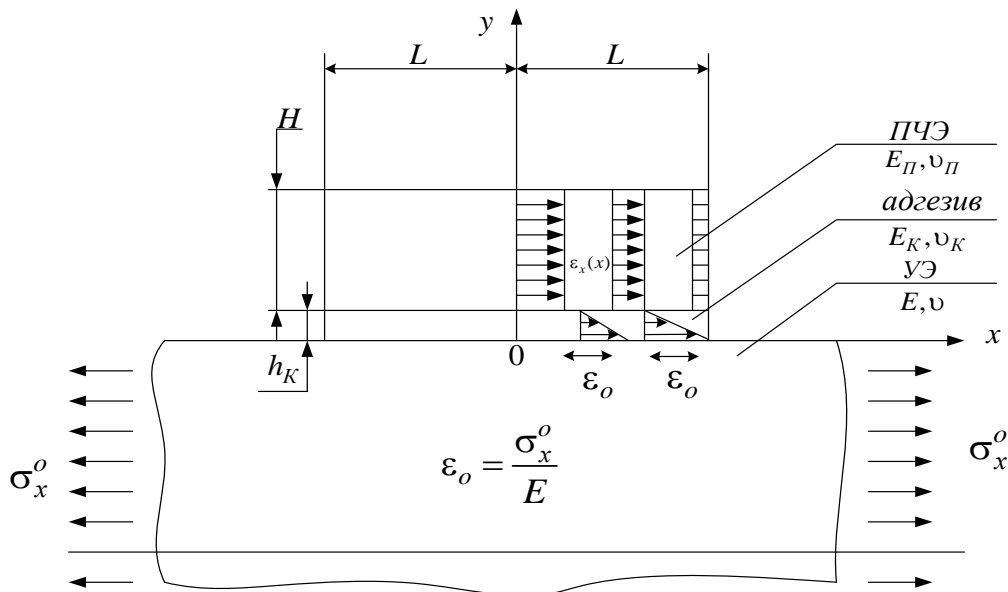


Рис. 1. Расчетная схема задачи о совместном деформировании системы: основание – контактный материал – ПЧЭ

В предположении, что напряженное состояние ПЧЭ характеризуется постоянным по сечению механическим напряжением, вызванным касательными напряжениями, а средняя деформация в ПЧЭ равна деформации контактного материала, решение задачи сводится к системе

$$\left. \begin{aligned} AC &= \varepsilon_o \\ \varepsilon_p &= \frac{E_k AL^2}{3(1 + \partial_k) E_{II} H} = A(c - h_k) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решив эту систему относительно ε_p , можно определить коэффициент передачи деформации от основания к ПЧЭ

$$K = \frac{1}{1 + \frac{3(1 + \partial_k) h_k H E_{II}}{E_K L^2}} < 1: \quad (4)$$

Рассмотрим некоторые предельные следствия полученной формулы. При

$$\left. \begin{aligned} E_{II}/E_K &\rightarrow \infty & K &\rightarrow 0 \\ h_k/L &\rightarrow \infty & K &\rightarrow 1 \\ H/L &\rightarrow \infty & K &\rightarrow 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следовательно, для уменьшения передачи деформаций от основания к ПЧЭ необходимо стремиться к выбору контактного материала с низким модулем упругости, максимально возможно увеличить толщину контактного материала h_k и толщину H кристалла ПЧЭ. Такой вариант позволит создать приборы с высокой надежностью. В свою очередь для максимальной тепловой эффективности необходимо использовать контактный материал с максимальной теплопроводностью.

Список литературы

[1] Адарчин С.А., Косушкин В.Г., Максимова Е.А. Методика расчета величин упругих напряжений в МЭМС датчиков давления // Тр. МГТУ № 587 «Методы исследования и проектирования сложных технических систем». Москва, 2004, С.37-47.

[2] Под редакцией академика Осипьяна Ю.А. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках. М.: Эдиториал УРСС, 2000, 320 с.

Аунг Пьей Зон – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungpyesone49@gmail.com

Мазин Анатолий Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Информационная безопасность автоматизированных систем" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazinav@yandex.ru

Г.В. Прасицкий, А.П. Коржавый

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ПОР МОЛИБДЕНОВЫХ КАРКАСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЛИБДЕНОВО-МЕДНЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одними из ключевых материалов для отвода тепла от полупроводниковых и СВЧ-устройств являются молибденово-медные псевдосплавы.

Для получения псевдосплава с необходимыми параметрами необходимо точно подобрать соотношение составляющих материалов. В свою очередь, для этого необходимо изучить структуру спеченного каркаса, определить диаметр пор [1].

Для определения размеров пор различных пористых сред существует большое количество методов, которые основаны на теоретическом допущении, что пористая система пронизана системой капилляров крупного сечения. Методы определения размеров пор можно разбить на две группы: основанные на измерении скорости протекания жидкости или газа через пористую среду, и использующие капиллярные явления.

В работе был использован метод определения диаметра пор по максимальному давлению пузырьков. Он основан на измерении давления, которое необходимо для того, чтобы продавить воздух через поры фильтрующего элемента, наполненные жидкостью с известным поверхностным натяжением. Общий вид уравнения, на котором базируется этот метод, следующий:

$$d = \frac{4\sigma \cos \theta}{\Delta P}, \quad (1)$$

где: d – диаметр капилляра в м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости на границе газ–жидкость в Н/м;

θ – краевой угол смачивания в град.;

ΔP – перепад давления в Н/м².

Этой формулой практически не пользуются, так как при вытеснении жидкости из пор металлокерамических фильтрующих элементов краевой угол будет меняться от 0° до 90°, что обуславливается сложной формой поровых каналов. Поэтому при расчетах величина краевого угла смачивания принимается постоянной, равной нулю. В этом случае формула принимает вид:

$$d = \frac{4\sigma}{\Delta P}. \quad (2)$$

Размеры пор определяются следующим образом: металлокерамический фильтрующий элемент предварительно перед испытанием пропитывают спиртом в течении 2 часов. На рис. 1 изображена схема ячейки для

образцов, имеющих дисковую форму. На элемент 1 надевают резиновое уплотняющее кольцо 2 и зажимают гайкой 3 в крышке 4. После этого, на открытую поверхность диска наливают слой спирта (воды) толщиной 3–5 мм и медленно подают воздух через штуцер 5, поднимая давление до тех пор, пока на поверхности фильтрующего элемента не появится первый пузырек. При этом давлении воздух проходит через пору максимального размера. С повышением давления воздуха количество пузырьков увеличивается, и они начинают выходить из многих пор по всей поверхности фильтрующего элемента.

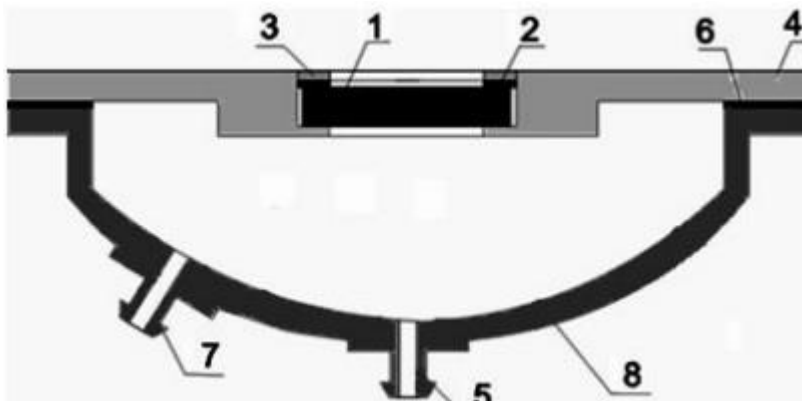


Рис. 1. Схема ячейки для дискового образца:

- 1 – металлокерамический образец, 2 – уплотнительная прокладка,
3 – зажимная гайка, 4 – крышка, 5 – штуцер, 6 – прокладка,
7 – штуцер манометра, 8 – корпус

Для определения среднего размера пор измеряется перепад давления в момент, когда пузырьки воздуха выходят из пор по всей исследуемой поверхности. Величины максимальных и средних диаметров пор рассчитывают по формуле (2) [2].

Была построена установка для проведения измерений, которую можно наблюдать на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид установки (слева) и ячейка для измерения дискового образца (справа)

В ходе данного эксперимента в качестве рабочей жидкости использовался ацетон.

В соответствии с данной методикой были вычислены диаметры пор спеченных молибденовых каркасов для псевдосплавов МД30, МД40 и МД50.

Таблица 1. Результаты измерений размеров пор молибденовых каркасов.

Исследуемый образец	Максимальный диаметр пор, мкм	Средний диаметр пор, мкм	Давление начала появления пузырей, 104Н/м2
МД30	-	5,6	1,57
МД40	2,98	2,5	3
МД50	1,375	1,1	6,5

Максимальный диаметр пор для образца МД30 не указан по причине единовременного обильного выделения пузырей.

Полученная информация о размере пор позволит более точно подбирать соотношение составляющих материалов, что в свою очередь, положительно скажется на свойствах псевдосплава.

Список литературы

[1] Прасицкий, Г. В. Параметры и техника получения теплоотводящих материалов для полупроводниковых приборов / Г. В. Прасицкий, М. В. Инюхин, А. П. Коржавый // Научные технологии. – 2014. – Т.15. – №2. – С. 10 – 19.

[2] Определение размера пор фильтрующего элемента: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Брус И.Д.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 13 с.

Прасицкий Григорий Васильевич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akatosh74@yandex.ru

Коржавый Алексей Панетелевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Промышленная экология и химия" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru

Е.Ю. Агу, И.В. Чухраев

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНЫХ КАТОДОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Многолетние научные и прикладные исследования, осуществленные за период существования газоразрядных приборов, в том числе малогабаритных гелий-неоновых лазеров, позволили создать на их основе множество типов устройств и систем. Это, прежде всего, навигационные системы для движущихся объектов.

При этом основные требования, предъявляемые к лазерам указанного типа: долговечность, стабильность и высокая надежность в основном зависят от параметров и свойств холодного катода, что дает основания считать его одним из основных элементов системы [1].

В соответствии с этим, решение вопросов усовершенствования конструктивных и улучшения эксплуатационных параметров катодов является актуальной задачей дальнейшего развития лазерной навигационной техники, поскольку именно лазерные гироскопы в настоящее время востребованы и широко применяются в навигации всех известных движущихся объектов.

Современные требования, предъявляемые к лазерным датчикам, работающим на использовании тлеющего разряда в гелий-неоновой смеси, позволяют сформулировать и основные параметры к холодным катодам [2]:

- минимальная долговечность в составе лазеров на уровне 30000 - 50000 часов;
- плотность тока на поверхности катода до 0,5мА/см²;
- малые массогабаритные характеристики и максимальная устойчивость к динамическим внешним воздействиям.

В качестве материалов холодных катодов гелий-неоновых лазеров наиболее часто используют бериллий, алюминий, тантал, поверхность которых покрыта оксидом или нитридом металла подложки [3]. Особый интерес в качестве холодного источника электронов для лазеров вызывает использование композиций, базирующихся на титане и цирконии [4].

Выбор материала и конструкции холодного катода осуществляется эмпирически с учетом данных по величине распыления и пороговой энергии распыления материала металл-диэлектрик. Но распыление химических соединений, в частности оксидов, изучено в настоящее время недостаточно.

В подавляющем числе форма холодного катода – цилиндр или стакан, дно которого выполнено в виде полусферы. Оптимальные размеры длина и диаметр, к настоящему времени четко оптимизированы. Эти размеры установлены в зависимости от требуемой мощности излучения, габаритов ла-

зера, состава и давления гелий-неоновой смеси и места расположения в лазере самого катода [3].

Особенно перспективны конструкции со вставным холодным катодом. При очевидной компактности катодов такого типа имеется возможность нанесения на его рабочую поверхность нужного тонкопленочного покрытия [5].

При этом, долговременная стабильность параметров гелий-неоновых лазеров обеспечивается использованием цилиндрических металлических катодов, на поверхности которых сформировано тонкопленочное оксидное покрытие. Для повышения защитных свойств пленочного покрытия важно обеспечение равномерной токовой нагрузки на поверхность катода, а также выбор оптимального набора электрофизических характеристик покрытия.

На фото, представленном на рис. 1., приведены известные к настоящему времени самые распространенные конструкции холодных источников электронов для гелий-неоновых лазеров.

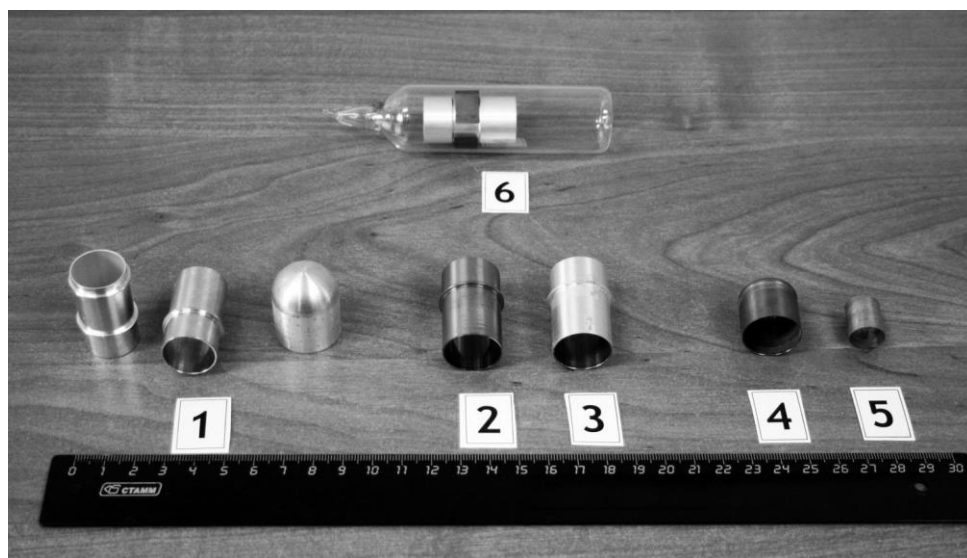


Рис. 1. Внешний вид холодных источников электронов (катодов) для газоразрядных лазеров: 1 – катоды на основе алюминия, 2 – катод из дистиллированного бериллия, 3 – катод из алюминиевого сплава на внутреннюю (рабочую) поверхность которого напылен слой из дистиллированного бериллия, 4 – катод из титана, 5 – экспериментальный образец катода из циркония, 6 – холодный катод в стеклянной вакуумированной технологической таре

Таким образом, установление закономерностей, связывающие основные характеристики холодного катода с параметрами технологического процесса его изготовления, а также разработка процесса изготовления долговечных холодных катодов является важной и актуальной задачей.

Список литературы

[1] *Лищук Н.В.* Разработка холодных катодов на основе бериллия и алюминия для гелий-неоновых лазеров с повышенной долговечностью: Автореф. дис. канд. тех. наук. – Москва, 1998. – 15 с.

[2] *Ньейн Чан* Исследование и разработка пленочного холодного катода гелий-неонового лазера: Автореф. дис. канд. ф-м. наук. – Москва, 2015. – 16 с.

[3] *Дерюгина Е.О.* Роль физико-химических свойств материала и конфигурации поверхности холодного катода в обеспечении его работоспособности в тлеющем разряде: Автореф. дис. канд. ф-м. наук. – Москва, 2004. – 20 с.

[4] *Агу Е.Ю., Челенко А.В., Никифоров Д.К., Никифоров К.Г.* Перспективы применения изделий электронной компонентной базы на основе наноструктурированных композиций титана и циркония // Электромагнитные волны и электронные системы - 2016. - Т. 21. № 8. С. 69-76.

[5] *Никифоров Д.К., Коржавый А.П., Никифоров К.Г.* Эмиттирующие наноструктуры «металл–оксид металла»: физика и применение: Монография / Под ред. А.П. Коржавого. – М.: Издательство МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2009. – 156 с.

Агу Елизавета Юрьевна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: liza.kornyuushina@gmail.com

Чухраев Игорь Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой "Компьютерные системы и сети" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: igor.chukhraev@mail.ru

УДК: 621.385: 541.127.3

В.В. Максимов, Н.Н. Бакутина, А.В. Челенко, О.В. Кузнецова

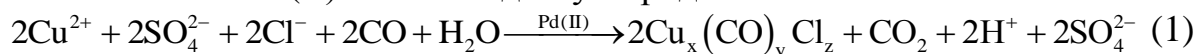
ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕДИ ПО ГИДРОКАРБОНИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ВАКУУМНОЙ И ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНИКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

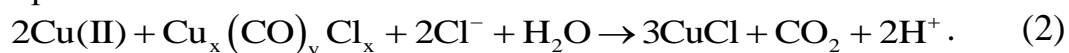
Известные к настоящему времени композиционные материалы для холодных (вторично-эмиссионных) катодов вакуумных СВЧ - приборов, в том числе магнетронов, имея высокие вторично - эмиссионные свойства, характеризуются в то же время неоднородностью, наличием посторонних примесей, неравномерностью распределения эмиссионных центров по рабочей поверхности катодов. Это связано с отсутствием отечественного производства высокочистых исходных порошкообразных материалов, таких как медь. Поскольку серийно производимая медь в качестве исходного материала, не только в виде порошков, применяют в деталях и узлах мощных СВЧ электровакуумных приборов (ЭВП) и газоразрядных приборах [2], возникли серьезные претензии к ряду их основных свойств, что требует углубленного анализа новых технологических требований с целью поиска путей улучшения физико-химических и технологических параметров меди.

Принципиальная технологическая схема гидрокарбонильного процесса (ГКП) была предложена И.В. Федосеевым и позволяет получать высокодисперсные порошки меди с контролируемым размером частиц и чистотой [4]. Исходя из данной схемы ГКП нами была получена медь из хлоридно-сульфатных растворов в три последовательных этапа:

1 этап – получение карбонилхлорида меди(I) путем каталитического восстановления Cu(II) монооксидом углерода:

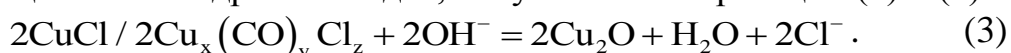


и возможным дальнейшим восстановлением карбонилхлорида меди(I) до CuCl при промывании:



Образующаяся медь(I) переходила либо в осадок, как CuCl (2), либо частично или вся оставалась в растворе в виде комплексного аниона $[\text{CuCl}_2]^-$, что определялось соотношением концентраций меди(II) и хлорид-иона в исходном растворе.

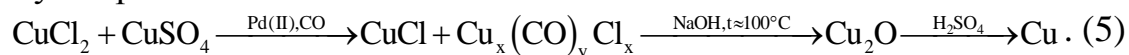
2 этап – щелочной гидролиз осадка, полученного по реакции (1) и (2):



3 этап – диспропорционирование полученного на 2-ом этапе оксида меди(I) в серной кислоте:



Суммарно по технологической схеме:



Установлено, что сочетание процесса гидрокарбонилирования, приводящего к удалению из раствора \square 95% меди, с операцией доводки путем обработки раствора порошком меди, позволяет технологически полностью удалить медь из растворов, содержащих Fe, Ni, Co и другие тяжелые цветные металлы. Причем, по уровню лимитирующих примесей выделяемая из растворов медь соответствует марке М000 [4].

В ходе эксперимента было установлено, что полученный ГК способом порошок меди (5) соответствовал заявленным физико-химическим и технологическим параметрам, а по размеру частиц лежал в диапазоне 0,5...10 мкм, что весьма востребовано в изделиях вакуумной и газоразрядной техники [5].

Выводы и рекомендации.

Экспериментальные образцы, полученные выше, высокодисперсных порошков меди контролируемого размера и чистоты, были спрессованы в наноструктурированные втулки (регенераторы CO_2), которые после окисления и получения на их поверхности закиси меди (Cu_2O) были армированы на поверхность цилиндрических электродов, изготовленных из палладиевой ленты. При опробовании таких узлов в малогабаритных CO_2 -лазерах, как и ожидалось [8], показали высокую эффективность и долговечность.

Эти испытания на долговечность проведены газоразрядных экспериментальных приборах в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{Xe}:\text{He}=1:1:0,5:4$ при общем ее давлении 20 мм. рт. ст. Парциальные давления компонентов газовой смеси в этих приборах не вышли за пределы требований, которые предъявляются к ним в отпаянных CO_2 -лазерах и испытания еще не завершены.

Список литературы

[1] Джонс В.Д. Основы порошковой металлургии. Свойства и применение порошковых материалов / Пер. с англ., под ред. Н.А. Бульenkova и др. М.: Мир. 1965. 390 с.

[2] Прокат из тяжелых цветных металлов. Справочник / М.Ф. Баженов, Д.Г. Карпачев, С.М. Миллер. М.: Металлургия. 1973. 424 с.

[3] Тенденции последнего 20-летия и перспективы // Металлоснабжение и сбыт. 2016. №5.127с.

[4] Федосеев И.В. Гидрокарбонильные процессы в технологии платиновых металлов. М.: Издательский дом «Руда и металлы». 2011. 128 с.

[5] Коржавый А.П., Максимов В.В., Федоров В.О. Получение исходных материалов для электронной компонентной базы радиоэлектронного производства // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. №1. С. 9-14.

[6] Горбунов А.К., Пчелинцева Н.И., Никифоров Д.К. Получение и использование наноструктур и нанопокровов в атомарных и молекулярных газовых лазерах // Научные технологии. 2014. Т. 15. №10. С. 54-60.

[7] Лоскутов С.А., Никифоров Д.К., Пчелинцева Н.И., Чистяков М.Г. Эффективные электроды с нанопокровов для малогабаритных приборов // Научные технологии. 2015. Т.16. №9. С. 51-55.

[8] Никифоров Д.К., Коржавый А.П., Никифоров К.Г. Эмиттирующие наноструктуры «металл-оксид металла»: физика и применение: монография / Под ред. А.П. Коржавого. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 156 с.

Максимов Владимир Владимирович – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: maksimov_W@mail.ru

Бакутина Наталья Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: natashamiy@yandex.ru

Кузнецова Ольга Владимировна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 3kuznetsova.olya2018@yandex.ru

Челенко Александра Викторовна – канд. техн. наук, старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: apererva@yandex.ru

А.И. Сиркели, В.Е. Драч

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РУПОРНОЙ АНТЕННЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рупорная антенна используется для передачи и приема СВЧ-сигналов. Она получила свое название из-за переменного (расширяющегося) сечения. Форма рупора может быть квадратной, прямоугольной или конической. Максимальное излучение и прием сигнала пропорциональны размерам рупора. В этом отношении антенна напоминает акустический рожок.

Для правильной работы рупорная антенна должна иметь определенный минимальный размер относительно длины волны входящего или выходящего электромагнитного поля. Если рупор слишком мал или длина волны слишком велика (частота слишком низкая), антенна не будет работать эффективно.

Рупорные антенны используются в радиолокационных системах малой дальности, особенно, используются сотрудниками правоохранительных органов для измерения скоростей приближающихся или отдаляющихся транспортных средств.

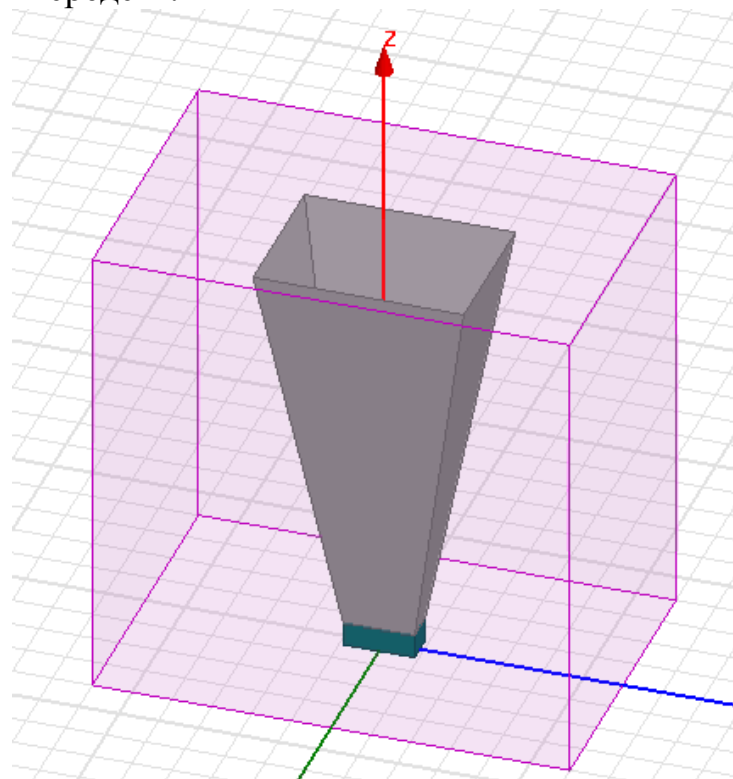


Рис. 1. Исследуемая рупорная антенна

Моделирование характеристик антенны проходит на частоте 15 ГГц.

Диаграмма направленности

Направленность является основным параметром антенны. Это показатель того, насколько «направлено» излучает антенна. Антенна, которая излучает одинаково во всех направлениях, будет иметь практически нулевую направленность, а направленность этого типа антенны будет равна 1 (или 0 дБ).

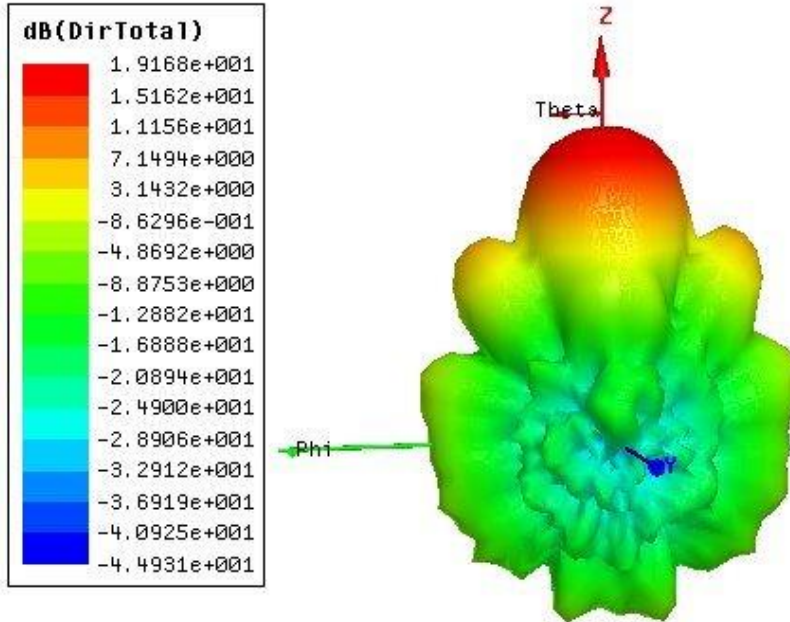


Рис. 2. Трехмерная диаграмма направленности излучения антенны

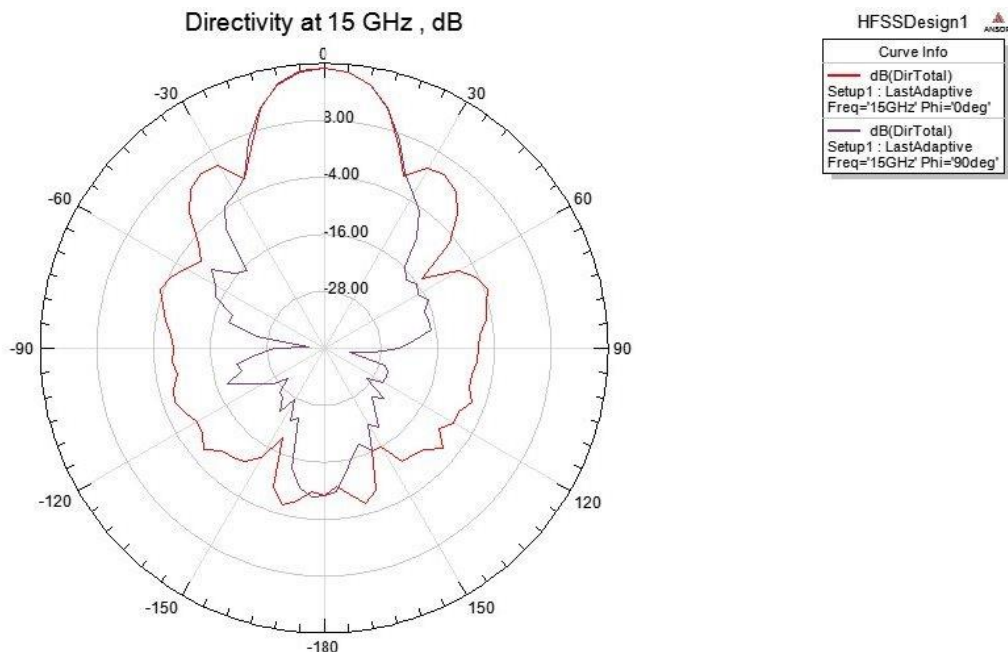


Рис. 3. Диаграмма направленности в плоскостях $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=90^\circ$

На рис. 2 видно, что максимальная направленность равна 19,1 дБ.

Реализуемое усиление

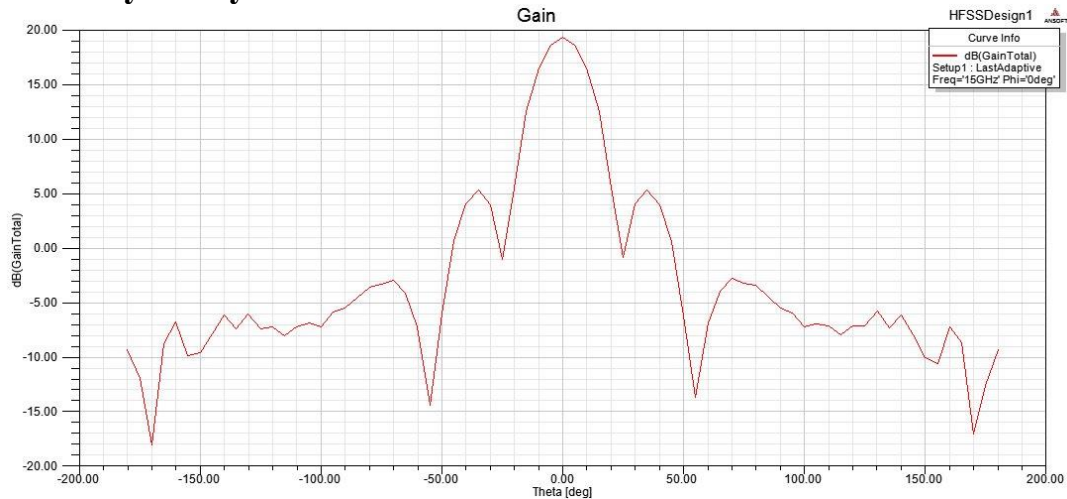


Рис. 4. Реализуемое усиление рупорной антенны

Из рисунка видно, что усиление антенны составляет 19 дБ, полученные данные совпадают с данными на рис. 2.

Эллиптическая поляризация электромагнитной волны

Эллиптическую поляризацию электромагнитной волны принято характеризовать коэффициентом эллиптичности поляризации (Axial Ratio – AR), который определяется отношением длин большой и малой осей эллипса и выражается в децибелах.

На рис. 5 показаны рассчитанные на частоте 15 ГГц угловые зависимости отношения большой и малой осей эллипса поляризации AR (дБ) в дальней зоне.

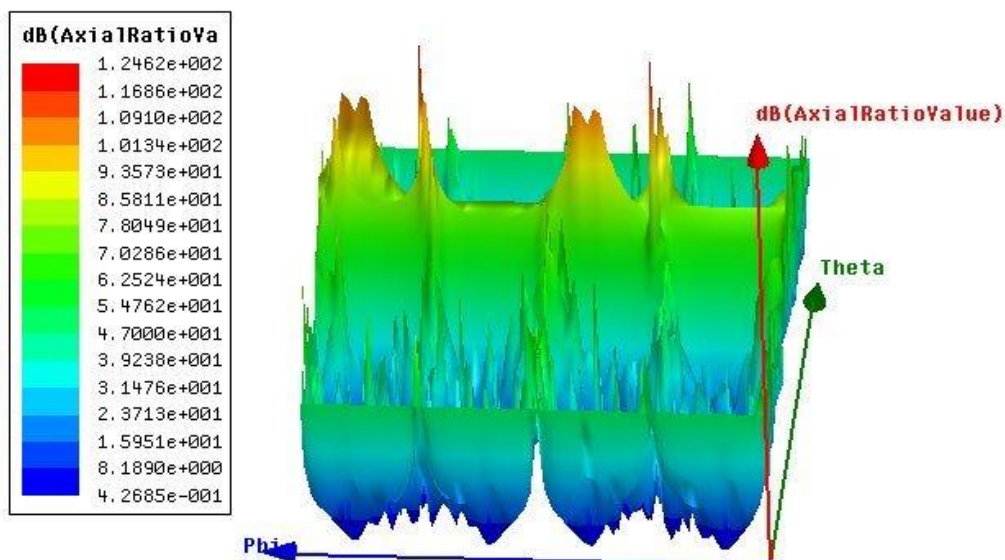


Рис. 5. Трехмерный график, иллюстрирующий зависимость величины AR (дБ) от направления излучения

Согласно графику на рис. 5, максимальный коэффициент эллиптичности поляризации составляет 12,4 дБ.

Распространение электромагнитного поля

На рис. 6 можно увидеть, как распространяется электромагнитное поле в рупоре антенны.

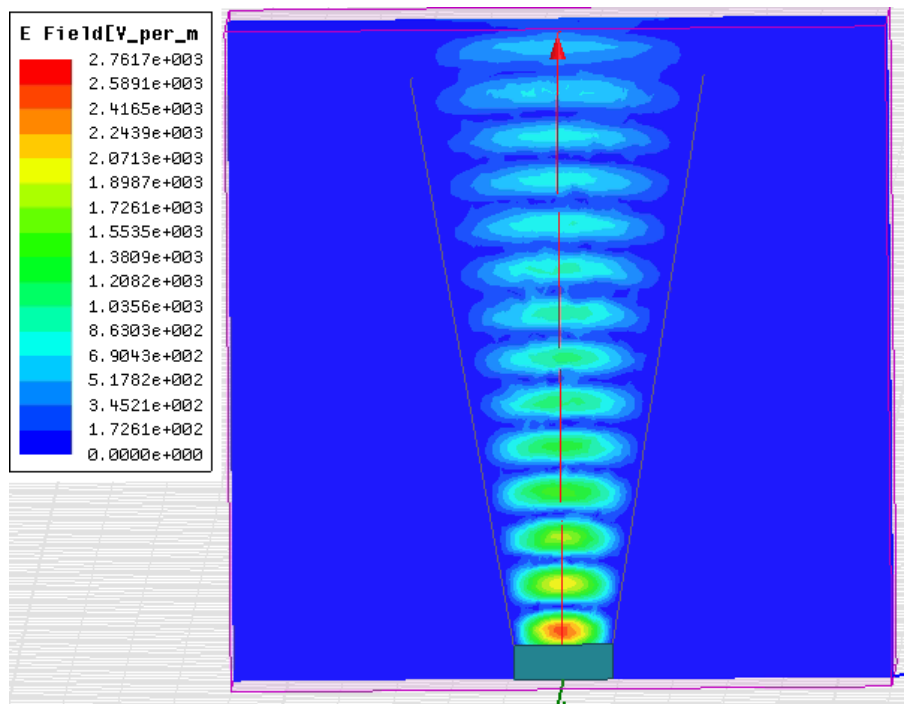


Рис. 6. Электромагнитное поле, распространяющееся по рупорной Антенне

В результате моделирования были получены следующие данные: максимальная направленность антенны и ее усиление составляет 19,1 дБ, коэффициент эллиптичности поляризации - 12,4 дБ, также была получена картина распространения электромагнитного поля в антенне.

Список литературы

- [1] *HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Ansoft, 2004.*
- [2] *Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS. Под ред. д.т.н., проф. Банкава С.Е. -М., СОЛОН-Пресс, 2004, 208 с.*
- [3] *Заикин И.П., Тоцкий А.В., Абрамов С.К. Проектирование антенных устройств систем связи – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэро- косм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 78 с.*
- [4] *Ямайкин В.Е., Ковалев В.Н., Маслов В.Г., Рунов А.В. Основы проектирования антенных устройств СВЧ: В 2 ч. – Минск: ВИЗРТУ, 1972. – Ч. 2.*

Сиркели Анна Ивановна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: a.sirkeli93@mail.com

Драч Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Конструирование и производство электронной аппаратуры" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: drach@kaluga.or

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

А.А. Митяшов, Д.В. Шевелев, А.А. Жинов

АНАЛИЗ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НАЧАЛА XX ВЕКА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электроэнергетика является одной из основ национальной экономики. В настоящее время более 80% электрической энергии производится с помощью энергетических установок, использующих органические виды топлив – природный газ, мазут, уголь и пр. Среди всего многообразия таких энергетических установок особое место занимают газотурбинные энергетические установки (ГТУ). Диапазон единичных мощностей от десятков киловатт до сотен мегаватт, быстрота запуска, компактность, простота в эксплуатации предопределили широкий спектр областей применения ГТУ – от мобильных установок аварийного электроснабжения до работы в составе мощных ПГУ несущих базовую энергетическую нагрузку.

Первые концептуальные модели газотурбинных установок появились на рубеже 18 и 19 веков. В 1791 году английский инженер Джон Барбер получил патент в котором в деталях описал принцип функционирования газовой турбины [1]. Его двигатель был оснащен поршневым компрессором, камерой сгорания и турбиной (рис. 1). Работать двигатель должен был на газе, получаемом из твердых органических топлив методом газификации.

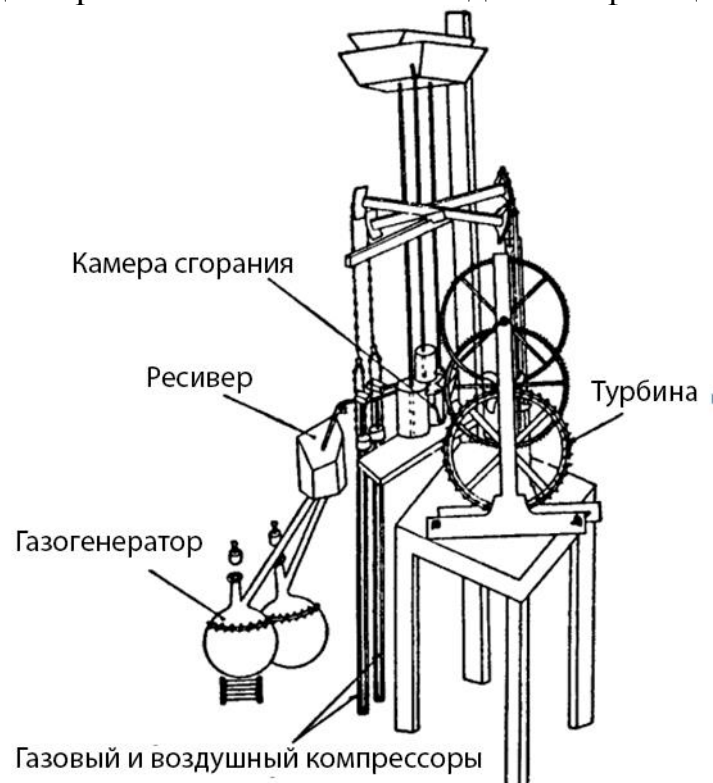


Рис. 1. Газовый двигатель Барбера

В 1837 году француз М. Брессон запатентовал газотурбинный двигатель, в котором для подачи воздуха в камеру сгорания впервые использовалась турбомашина – вентилятор. В камере сгорания воздух смешивался с топливным газом и сжигался. Высокотемпературные продукты сгорания охлаждались воздухом не участвовавшим в процессе горения и направлялись в турбину «подобную водяному колесу» [2].

В 1872 г немецким инженером Францем Штольце была запатентована газотурбинная установка. Она представляла собой одновальный двигатель, состоящий из 10-ти ступенчатого осевого компрессора со степенью повышения давления $\pi_k=2.5$, камеры сгорания и 15-ти ступенчатой турбины (рис. 2). Начальная температура газа перед турбиной была 400 °С. Построенная по его проекту в 1904 году установка не подтвердила заложенные в нее параметры – ее мощности не хватило даже на поддержание рабочего процесса, она не смогла крутить сама себя [3].

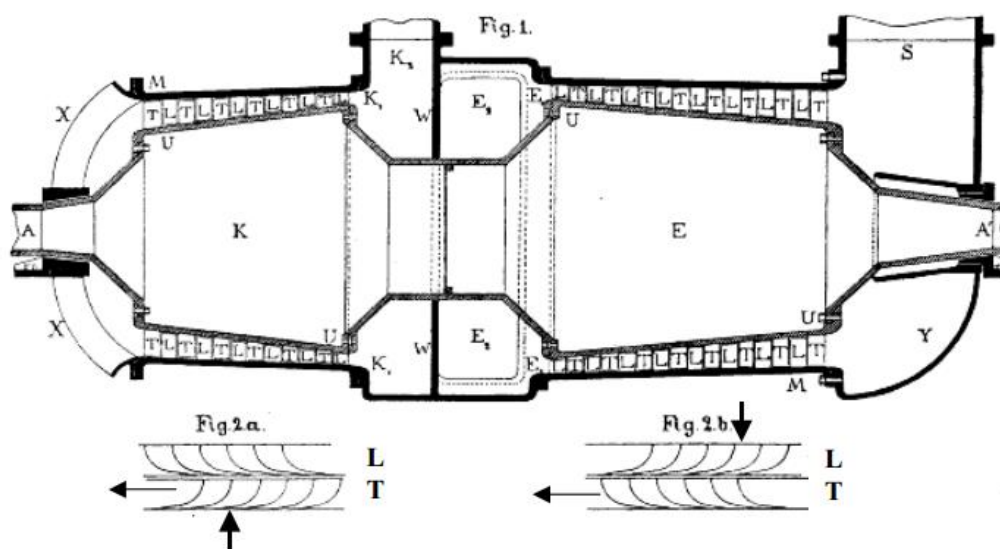


Рис. 2. Газотурбинная установка по проекту Франца Штольце

В России, в 1887-1892 г инженером-механиком русского флота Павлом Дмитриевичем Кузьминским был разработан и построен газотурбинный двигатель, состоящий из воздушного компрессора, камеры сгорания и радиальной турбины (рис. 3). П.Д. Кузьминский применил охлаждение камеры сгорания водой. Вода охлаждала стенки, испарялась, а полученный пар смешивался с воздухом и поступал в турбину [7]. Из-за смерти изобретателя работы над двигателем не были завершены.

В 1906 г. во Франции под руководством инженеров Арманго и Лемалья была построена газотурбинная установка мощностью 400 л.с (рис. 4). Установка состояла из трехкорпусного 25-ти ступенчатого центробежного компрессора со степенью повышения давления $\pi_k=4.2$, камеры сгорания использующей в качестве топлива керосин и газовой турбины со ступенями скорости (Кертиса).

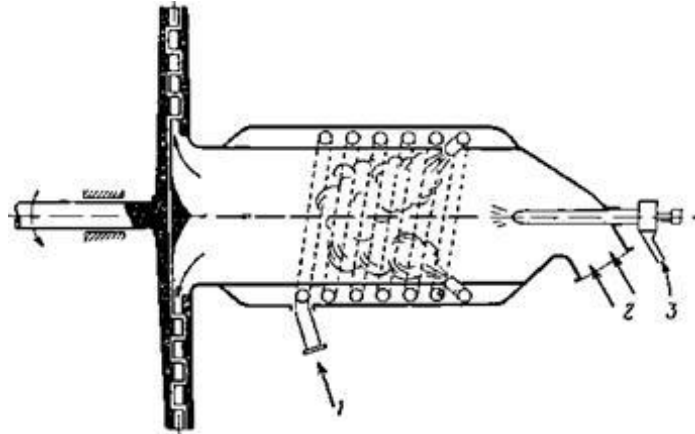


Рис. 3 – Газотурбинная установка П.Д. Кузьминского:
 1 – патрубок для подачи воды; 2 – патрубок для подачи сжатого воздуха;
 3 – труба для подвода топлива к форсунке.

Начальная температура газа перед турбиной составляла 560 °С. Для охлаждения камеры сгорания, сопловых лопаток и дисков турбины использовалась вода. Экспериментально определенный КПД этой установки составил 3% [5].

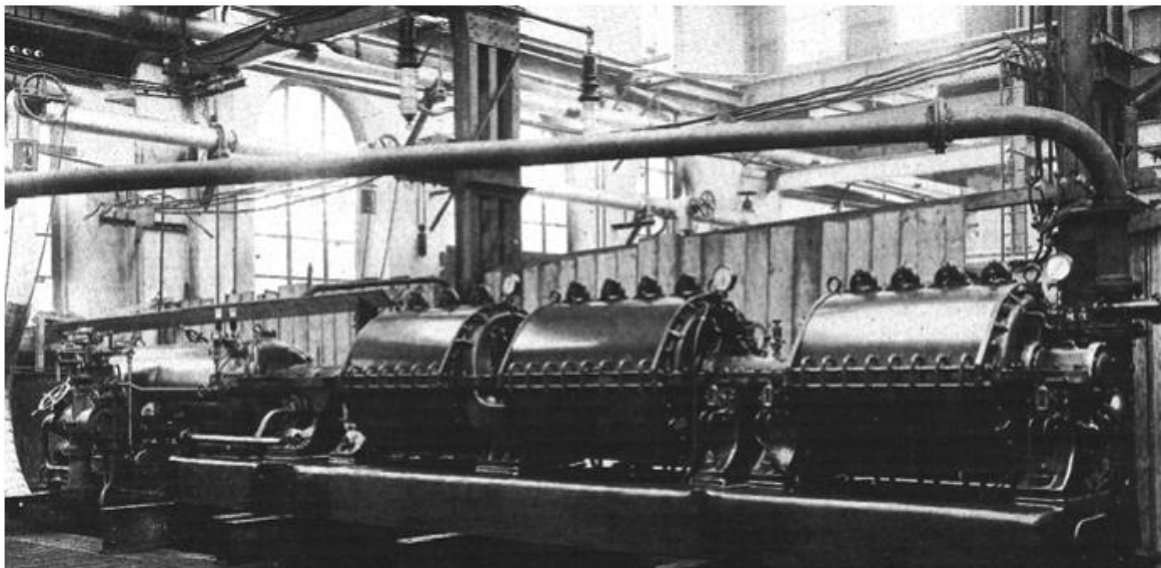


Рис. 4. Газотурбинная установка по проекту Арманго и Ламалья

Низкая эффективность экспериментальных турбин Штольце, Арманго и Лемалья объяснялось низким КПД ее элементов, и прежде всего, КПД компрессора. Это побудило многих изобретателей искать такие способы организации рабочего процесса газотурбинных установок, для которых не требовалось бы применение воздушного компрессора. Это удалось осуществить путем организации процесса горения при постоянном объеме.

В 1908 году русский инженер В.В. Караводин создал и испытал опытную модель такой газовой турбины [1]. В Германии в 1914-1920 годах инженером Хольцвартом построен ряд газотурбинных установок со сгорани-

ем при постоянном объеме. На рис. 5 представлена схема экспериментальной установки Хольцварта мощностью 735 кВт производства фирмы Брун-Бовери [6]. Проведенные испытания опытных образцов показали низкую надежность таких установок, отсутствие преимуществ перед активно разрабатываемыми в то время паротурбинными установками.

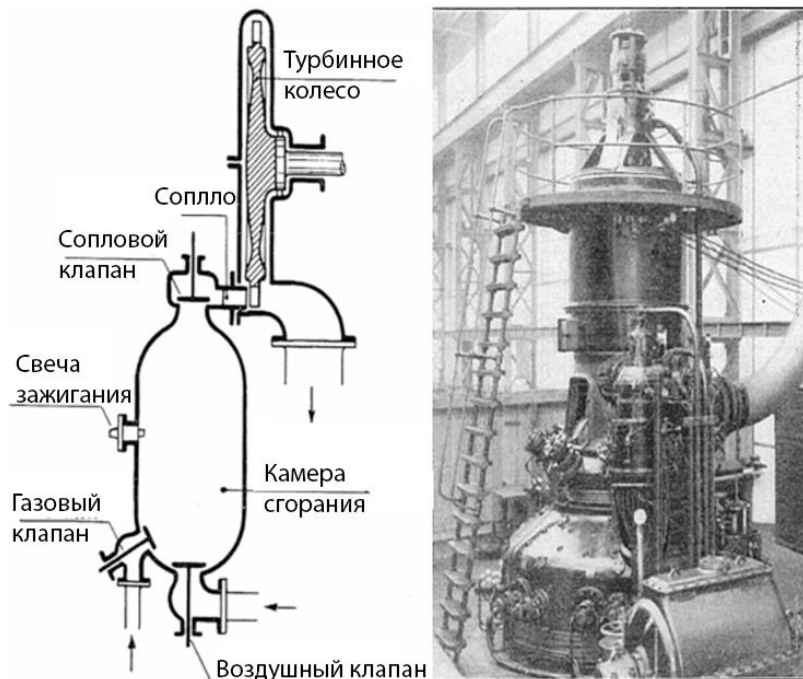


Рис. 5. Схема и фотография экспериментальной турбины Хольцварта

Несмотря на то, что концепция газовой турбины была хорошо известна широкому кругу ученых и инженеров, а проведенные на рубеже XIX и XX веков испытания, подтвердили жизнеспособность выдвинутых идей, прогресс в области энергетических газотурбинных установок в первой половине XX века шел медленными темпами. Основными причинами этого были:

- недостаточное теоретическое обоснование методик расчета и проектирования осевых и центробежных лопаточных машин;
- отсутствие необходимых жаропрочных и жаростойких материалов;
- существенно более низкий к.п.д. таких установок по сравнению с существующими на тот момент двигателями других типов;
- недостаточная надежность при длительной эксплуатации.

Тем не менее, сделанные в 20-30-х годах XX века научные работы Л. Прандтля, Н.В. Жуковского, С.А. Чаплыгина С.А в области газодинамики, А. Стодолы, М.И. Яновского, В.М. Маковского в теории турбомашин и прогресс в материаловедении начали приносить свои плоды.

Наиболее важным и значимым стал прогресс в области расчета и проектирования осевых компрессоров. Это позволило создать в 30-е годы установки со сравнительно высокими параметрами рабочего тела и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В Советском Союзе, в 1934 году была испытана первая газотурбинная установка ГТУ-1, созданная под руководством профессора ММИИ им. Н.Э. Баумана В.В. Уварова. Она состояла из одноступенчатой газовой турбины, камеры сгорания и одноступенчатого центробежного компрессора (рис. 6) и имела мощность 7,4...11 кВт. Установка успешно проработала 25 ч. При температуре газа перед турбиной 1100 °С и частоте вращения ротора $n=22\ 000$ об/мин [7]. Такие высокие значения параметров этой установки намного превосходили аналогичные у зарубежных установок.

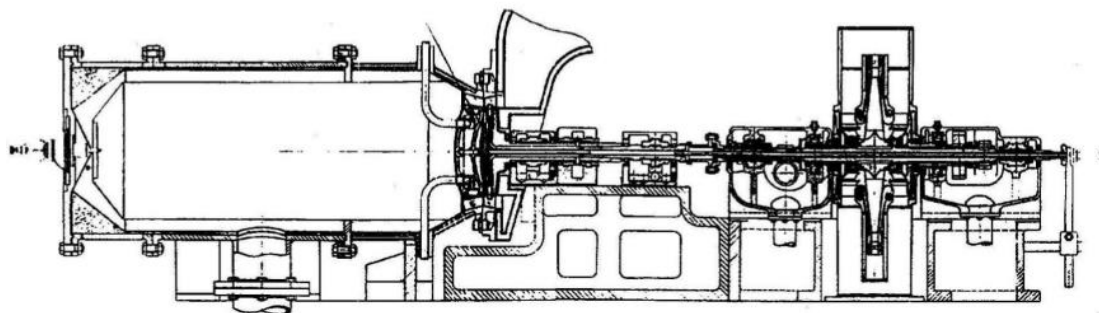


Рис. 6. Продольный разрез газотурбинной установки ГТУ-1

В 1939 году в городе Невшатель, Швейцария, вступила в работу первая коммерческая газотурбинная электростанция, построенная фирмой Броун-Бовери. Газотурбинная установка работала по простой схеме, включала в себя 23-и ступенчатый осевой компрессор со степенью повышения давления $\pi_k=4,4$, индивидуальную камеру сгорания (температура газа перед турбиной 550 °С) и семиступенчатую реактивную осевую турбину (рис.7).

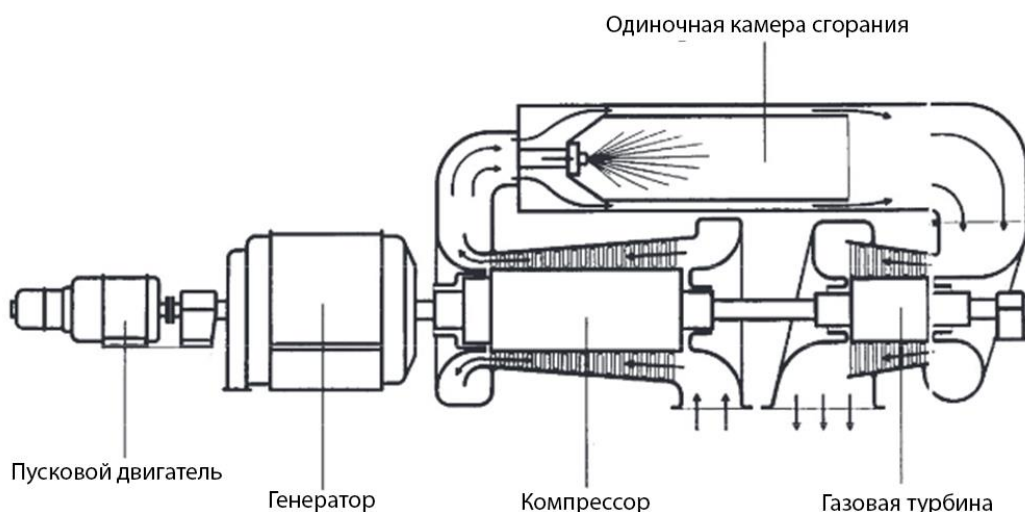


Рис. 7. Схема первой коммерческой энергетической установки

Мощность установки составляла 4 МВт, а ее КПД 17,4%. По данным испытаний, которыми руководил А. Стодола внутренний КПД турбины составил 88%, а компрессора – 85 % [6].

Начавшаяся Вторая мировая война, затормозила строительство энергетических газотурбинных установок, основное внимание научных коллективов и производителей было направлено на разработку перспективных авиационных газотурбинных двигателей. В последствии эти двигатели стали основными в авиации.

Технологии в газотурбостроении продолжали развиваться и с 50-х годов XX века начался период массовой коммерческой эксплуатации серийных газотурбинных установок, сначала в авиации, а затем и в энергетике.

Литература

[1] Меркулов И.А. Газовая турбина. М.: Издательство технико-теоретической литературы. 1957 г.

[2] «A History Of Mechanical Inventions», Abbott Payson Usher, 1988.

[3] The Combustion Gas Turbine: Its History, Development and Prospects. Dr. Adolph Meyer. Brown Boveri Company. The Institution of Mechanical Engineers. London. February 1939.

[4] Костенков В.И., Яковлев Е.А. П.Д. Кузьминский – ученый, инженер, новатор // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. – 1952. – №2.

[5] Cyrus V. Meher-Homji The Historical Evolution Of Turbomachinery. Proceeding of The 29th Turbomachinery Symposium.

[6] Dietrich Eckardt Gas Turbine Powerhouse. The Development of the Power Generation Gas Turbine at BBC-ABB-Alstom. Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Göttingen.

[7] Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.

Митяшов Артем Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mityashov-artyom@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. каф. "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Г.А. Круглова, А.А. Жинов

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА У КОРНЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК НА ОСЕВОЕ УСИЛИЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЕ НА СТУПЕНЬ ТУРБИНЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Надежная и безаварийная работа турбоустановки определяется многими параметрами, одним из которых является осевое усилие, действующее на ротор турбины. Полное осевое усилие находят суммированием составляющих для каждой ступени (осевого усилия, действующего на профильную часть рабочих лопаток; усилия, действующего на полотно диска; усилия, действующего на уступы ротора между диаметрами соседних диафрагменных уплотнений; усилия на выступы уплотнений), а также усилий, действующих на уступы ротора, расположенные вне проточной части ступеней [4].

Значительное влияние на осевое усилие, действующие на ротор турбины, оказывают переменные режимы ее работы, режимы пуска-останова, а также режимы работы основного и вспомогательного оборудования энергоустановки (конденсатора, регенеративных подогревателей, деаэратора, электрогенератора, регуляторов пара уплотнений и т.п.) [5].

Осевое положение ротора турбины, относительно статора, должно находиться в регламентируемых производителем пределах при всех режимах ее работы, в том числе во время прогрева, набора частоты вращения и нагружения турбины. При пуске и резком изменении режима работы турбины возможен рост относительного расширения ротора.

При пуске, различные части турбины прогреваются с разной скоростью. Быстрее всего прогреваются лопатки и диски, затем вал и корпус турбины. Обычно величина зазоров в проточной части выбирается с таким расчетом, чтобы достичь максимального КПД проточной части и вместе с тем обеспечить достаточно высокие скорости прогрева и охлаждения цилиндров без опасности задеваний в уплотнениях или проточной части [1].

В данной статье представлены результаты проведенного исследования влияния величины зазора осевого уплотнения у корня рабочих лопаток на осевое усилие, действующее на ступень турбины. Расчеты проводились в программе, написанной на базе методики РТМ [2,3].

Получена зависимость между изменением ширины зазора у корня лопаток $\delta_{ц}$ и осевым усилием, действующим на ступень турбины. Расчет проводился на примере второй ступени турбины Т-48 производства ОАО «КТЗ». Все необходимые исходные данные были взяты из теплового расчета проточной части данной турбины. В исследовании учитывалось, что осевое уплотнение имеет один уплотнительный усик, ширина передней

камеры - h , изменялась соответственно величине $\delta_{щ}$. Ширина зазора менялась в диапазоне $[0,0012 - 0,0034]$ м.

Результаты расчетов приведены в Таблице 1, Таблице 2 и Таблице 3. Здесь: $\Delta_{щ}$ – длина зазора у корня лопаток; ρ_{∂} – осредненная степень реактивности по диску; $\rho_{л}$ – действительная степень реактивности ступени на среднем диаметре; $\rho_{к}$ – действительная корневая степень реактивности; $G_{щ}$ – расход через корневой зазор; G_{∂} – расход через разгрузочные отверстия; $G_{уд}$ – расход через уплотнение диафрагмы; $P_{л}^P$ – осевое усилие, действующее на лопатки и обусловленное статическим перепадом давлений; $P_{л}^c$ – осевое усилие, действующее на лопатки и обусловленное разностью осевых составляющих скоростей пара на входе и выходе рабочих лопаток; P_{∂} – осевое усилие, действующее на диск; P – суммарное усилие на ступень.

Таблица 1. Влияние отношения $\delta_{щ}/h$ на расход пара в корневом зазоре, в разгрузочных отверстиях и в уплотнении диафрагмы

$\delta_{щ}/h$	$\Delta_{щ}, \text{м}$	ρ_{∂}	$G_{щ}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_{\partial}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_{уд}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$
0,218	0,001	0,023	-0,262	1,922	-1,67
0,271		0,0225	-0,189	1,995	-1,67
0,306		0,0217	-0,154	2,026	-1,671
0,348		0,0203	-0,141	2,041	-1,673
0,386		0,0187	-0,16	2,023	-1,674
0,419		0,0172	-0,191	1,989	-1,675
0,442		0,0162	-0,216	1,968	-1,676

Таблица 2. Влияние $\delta_{щ}/h$ на степени реактивности

$\delta_{щ}/h$	$\Delta_{щ}, \text{м}$	ρ_{∂}	$\rho_{к}$	$\rho_{л}$
0,218	0,001	0,023	0,049	0,071
0,271		0,0225	0,051	0,0726
0,306		0,0217	0,0518	0,0732
0,348		0,0203	0,0522	0,0735
0,386		0,0187	0,0517	0,0731
0,419		0,0172	0,0507	0,0725
0,442		0,0162	0,0502	0,072

Таблица 3. Влияние δ_{uz}/h на осевое усилие

δ_{uz}/h	$\Delta_{uz}, \text{м}$	ρ_δ	$P_l^p, \text{Н}$	$P_l^c, \text{Н}$	$P_\delta, \text{Н}$	$P, \text{Н}$
0,218	0,001	0,023	$5,828 \cdot 10^3$	462,932	$1,724 \cdot 10^4$	$2,354 \cdot 10^4$
0,271		0,0225	$5,94 \cdot 10^3$		$1,668 \cdot 10^4$	$2,308 \cdot 10^4$
0,306		0,0217	$5,994 \cdot 10^3$		$1,607 \cdot 10^4$	$2,252 \cdot 10^4$
0,348		0,0203	$6,014 \cdot 10^3$		$1,506 \cdot 10^4$	$2,153 \cdot 10^4$
0,386		0,0187	$5,984 \cdot 10^3$		$1,388 \cdot 10^4$	$2,033 \cdot 10^4$
0,419		0,0172	$5,935 \cdot 10^3$		$1,272 \cdot 10^4$	$1,912 \cdot 10^4$
0,442		0,0162	$5,896 \cdot 10^3$		$1,2 \cdot 10^4$	$1,835 \cdot 10^4$

Вывод: результаты исследования показывают, что с увеличением δ_{uz}/h степень реактивности диска (ρ_δ) - падает, также уменьшается усилие, действующее на диск (P_δ), усилие, действующее на ступень (P) и расход через уплотнение диафрагмы ($G_{y\delta}$). Степени реактивности ρ_k и ρ_l , расход через разгрузочные отверстия (G_o) и расход через корневой зазор (G_{uz}), а также усилие, действующее на лопатки, обусловленное статическим перепадом давлений (P_l^p), имеют, для рассмотренной ступени турбины, максимальное значение при $\delta_{uz}/h = 0,348$.

Представленная методика и программа расчета позволяет выбирать оптимальные величины осевых зазоров в корневых осевых уплотнениях ступеней турбины при проектировании.

Список литературы

- [1] Дворовенко В.Н. Ликвидация аварийных режимов мощных паровых установок. – К.: Техніка, 1979. -128с.
- [2] РТМ 108.021.08-86. Турбины паровые стационарные. Расчет осевого усилия.
- [3] РТМ 24.021.08. Турбины паровые стационарные. Нормы теплового расчета. Расчет осевого усилия.
- [4] Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. – 2-е изд., пререб. и доп./А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М.: Издательство МЭИ, 2001. -488с. ил.
- [5] Серезкина Л.П., Зарецкий Е.И. Осевые подшипники мощных паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.

Круглова Галина Алексеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: signora.pandora@ya.ru

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. каф. "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

С.В. Ибрагимов, В.Ю. Ильичев

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ГРЕБНЕЙ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ТУРБИН НА ПРОТЕЧКИ ПАРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Уплотнение зазоров между роторными и статорными деталями машин на сегодняшний день остается актуальной инженерной задачей. Для этого в различных роторных машинах широкое распространение получили лабиринтные уплотнения, отличающиеся способностью работать в жидких и газообразных средах во всем диапазоне температур и перепадов давления рабочего тела, используемых в паровых турбинах [1].

Работа лабиринтного уплотнения основана на процессе дросселирования пара через группу последовательно расположенных элементов уплотнения. Каждый элемент уплотнения состоит из щели, в которой статическое давление частично преобразуется в динамический напор, и камеры, в которой динамический напор преобразуется в тепловую энергию из-за потерь на вихреобразование и трение [2].

Эффективность лабиринтного уплотнения зависит от величины радиального зазора, количества гребешков и их конфигурации, а также конфигурации и размеров камер.

В данном докладе приведены результаты расчета переднего концевого уплотнения турбины К-12-4,2 с различными углами наклона уплотнительного гребня с целью дальнейшей оптимизации данного уплотнения (уменьшения протечек пара).

Определяющими размерами уплотнения являются необходимые величины осевого разбега ротора c и радиального зазора δ . При проектировании турбомашин эти размеры назначаются с учетом вероятных радиальных и осевых взаимных перемещений ротора и статора под влиянием температурных, динамических и других эксплуатационных и технологических факторов [3].

Исходная величина радиально зазора δ (мм) была определена по эмпирической формуле, учитывающей влияние различных факторов:

$$\delta = \alpha T \left[0,04d + \frac{0,017x(L-x)}{D} \right] + 0,25,$$

где α – наибольший из коэффициентов температурного расширения для материалов статора и ротора турбомашин, $1/\text{К}$; T – наибольшая температура рабочей среды в корпусе турбомашин, К ; D – диаметр кольцевого уплотнительного зазора, мм ; L – расстояние между опорами, мм ; x – расстояние от данного уплотнительного гребня до ближайшей опоры, мм ; D – диаметр наружного корпуса в середине пролета, мм .

В соответствии с полученными значениями радиального зазора и осевого разбега ($\delta = 0,6 \text{ мм}$, $c = 7 \text{ мм}$) по [3] было выбрано ступенчатое уплотнение с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями (Рис. 1).

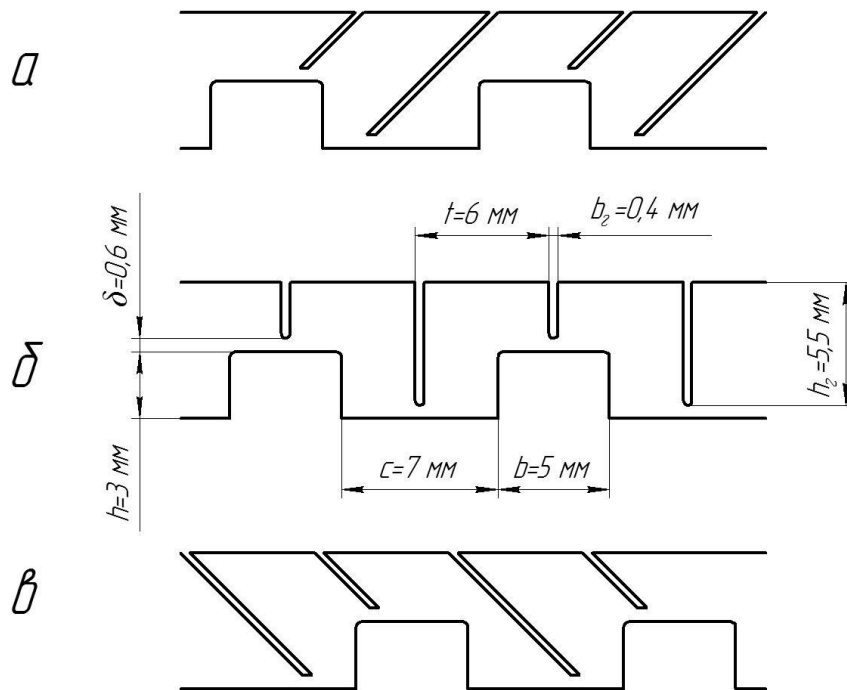


Рис. 1. Схемы уплотнений: *a* – с встречным уклоном уплотнительного гребня; *b* – без уклона; *v* – с попутным уклоном

При истечении через зазор δ , образуемый гребнем с достаточно острыми кромками, струя претерпевает сужение. Отрыв струи происходит в точке перехода от прямолинейной части профиля к закруглению. Расстояние δ_0 от точки отрыва струи до противоположной ограничивающей ее стенки принимается в качестве расчетной величины зазора:

$$\delta_0 = \delta + r(1 - \cos \theta_0),$$

где θ_0 – угол наклона входной стороны профиля гребня; r – радиус закругления гребня, мм.

Число уплотнительных гребней z рассчитывается по формуле:

$$z = \frac{2L_1}{c + b},$$

где L_1 – длина уплотнения, мм; b – ширина выступа, мм.

Расчет протечек G (кг/с) через уплотнение был выполнен по расчетной зависимости типа формулы Стодолы с поправочными коэффициентами, не требующая последовательных приближений, в международной системе единиц:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 \nu_0}},$$

где α_0 – коэффициент расхода; β – поправка на толщину кромки; δ_0 – расчетный зазор, м; ξ – поправка на малое число дросселей; d – диаметр кольцевой щели, м; p_0 – статическое начальное давление, Па; p – давление в последнем зазоре, Па; v_0 – начальный удельный объем среды, м³/кг; z – число зазоров или дросселей.

Полученные результаты величин протечек сведены в таблицу 1, а также построен график зависимости величины протечек от угла наклона уплотнительных гребней.

Таблица 1. Результаты расчета

Величина	Без уклона	Попутный уклон		Встречный уклон		
		45	75	30	45	75
$\theta, ^\circ$	90	45	75	30	45	75
$G, \text{кг/с}$	0,319	0,420	0,350	0,271	0,272	0,292

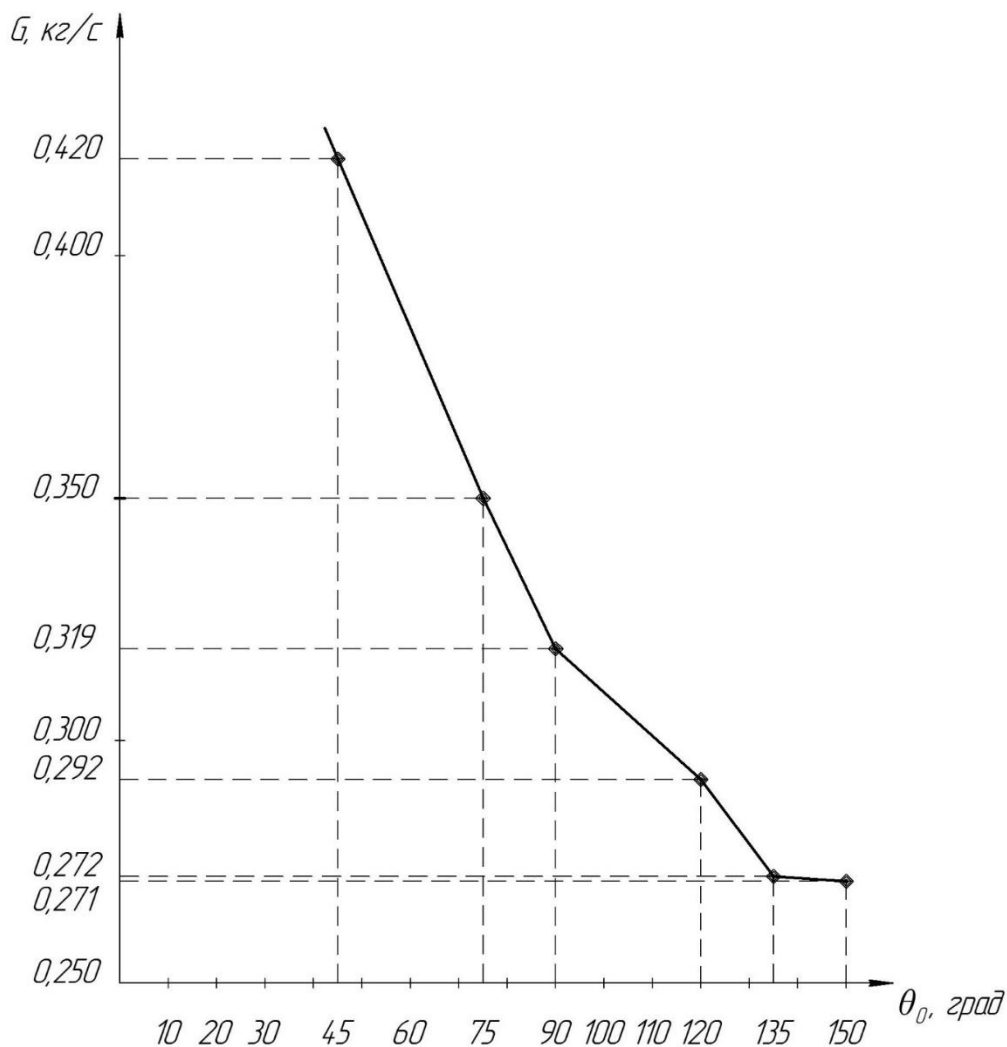


Рис. 2. Зависимости величины протечек от угла наклона уплотнительного гребня

Из результатов проведенного расчета видно, что протечки в уплотнении уменьшаются при наклоне гребней навстречу потоку.

Исходя из этого, а также из соображений технологичности при изготовлении уплотнения и исключением остаточного прогиба гребней уплотнения в случае их задеваний о ротор, можно сделать вывод, что из диапазона рассчитанных углов наклона гребней наиболее целесообразным представляется назначение угла наклона, равного 135 градусов (навстречу потока под углом 45 градусов), так как дальнейшее увеличение угла наклона не дает значительного уменьшения протечек, а также не способствует сохранению в эксплуатации исходной величины зазора и исходной конфигурации гребней вследствие возможных задеваний.

Список литературы

[1] *Смоленский А.Н.* Конструкция и расчет деталей паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1964. – 467 с.

[2] *Щегляев, А. В.* Паровые турбины. – М.: Энергия, 1967. – 4-е изд. – 301 с.

[3] РТМ 108.020.33-86. «Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет».

Ибрагимов Станислав Валерьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ibragish94@gmail.com

Ильичев Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

А.А. Сидоров, С.В. Киселев

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОТОКА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из способов повышения эффективности турбоустановки является увеличение начальной температуры рабочего тела [1]. При высоких температурах возникает необходимость охлаждения рабочих лопаток турбины. Целью данной работы является изучение влияния на неоднородность потока пористого охлаждения плоской решетки сопловых профилей и сравнение результатов с результатами расчетов при конвективном и пленочном охлаждении. Несмотря на то, что существует ряд трудностей для использования пористого охлаждения (создание материалов заданной пористости, усложнение конструкции турбины и другие причины), данный вид охлаждения остается перспективным направлением при создании высокотемпературных турбин [2]. Результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкций перспективных паровых и газовых турбин.

Аналогично исследованиям при конвективном и пленочном типе охлаждения [3,4,5], при пористом охлаждении объектом исследований была решетка полых сопловых профилей С-9022А. Влияние предыдущей рабочей решетки не учитывалось.

- количество профилей в решетке – 5,
- хорда профиля – 45 мм,
- относительный шаг решетки – 0,6,

Модель плоской сопловой решетки с пористым охлаждением представлена на рис.1.

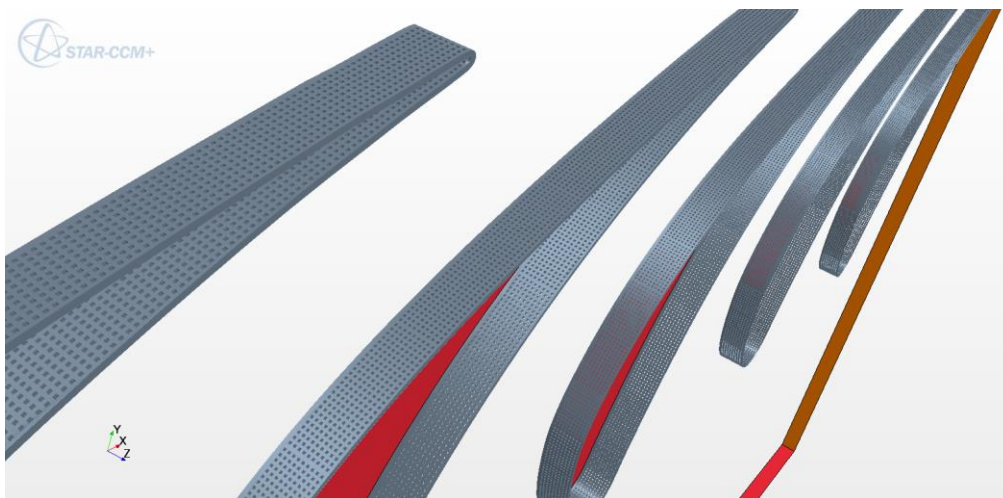


Рис. 1. Модель плоской сопловой решетки с пористым охлаждением

В данной модели в качестве пор использовалось большое число малых по размеру каналов, расположенных вдоль всей поверхности лопаток.

Для изучения неоднородности потока в следах за сопловыми лопатками с пористым охлаждением и сравнения результатов с результатами расчетов для других типов охлаждения была проведена серия расчетов при различных температурных режимах.

Рабочее тело – воздух. Начальные параметры:

– полные температуры $t_0 = 500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$

– полное давление 101325 Па

– скорость потока на входе в решетку $V_0 = 100$ м/с

Давление окружающей среды – атмосферное 101325 Па

– охлаждающая среда – воздух с параметрами:

– температура $t_{\text{охл}} = 100^\circ\text{C}$

– давление 101425 Па

– скорость охладителя $V_{\text{охл}} = 100$ м/с

В результате проведения нескольких серий расчетов были получены поля распределения параметров потока. На рис.2 показано поле температур при температуре основного потока $t_0 = 800^\circ\text{C}$.

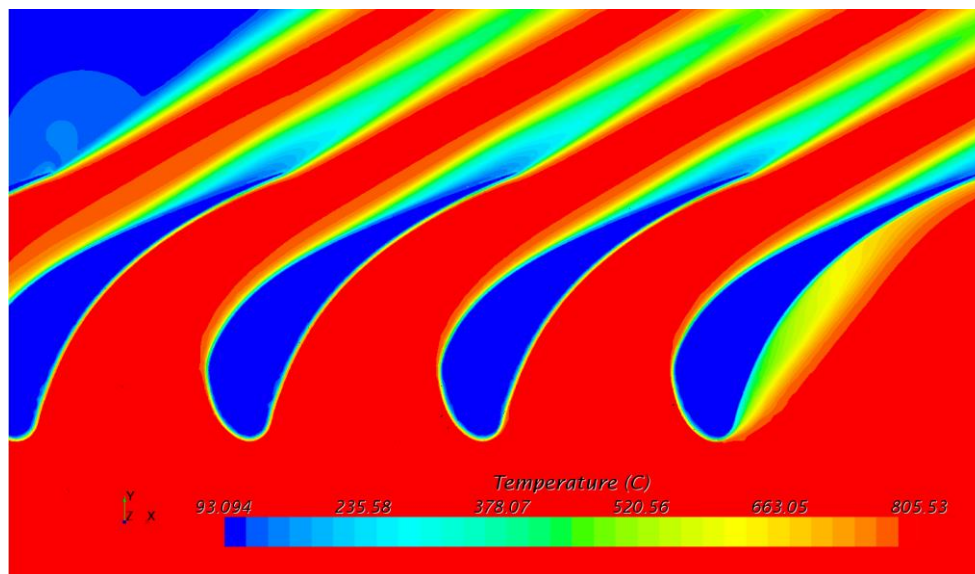


Рис.2 Поле температур при $t_0 = 800^\circ\text{C}$

Как можно увидеть из представленного выше поля температур, пористое охлаждение существенно снижает температуру материала лопаток, предотвращает пережег выходных кромок лопаток. С температурной точки зрения пористое охлаждение – очень эффективный способ охлаждения. Теперь оценим, как данный тип охлаждения влияет на неоднородность потока за сопловой решеткой. На рис.3 представлено поле скоростей потока при $t_0 = 800^\circ\text{C}$.

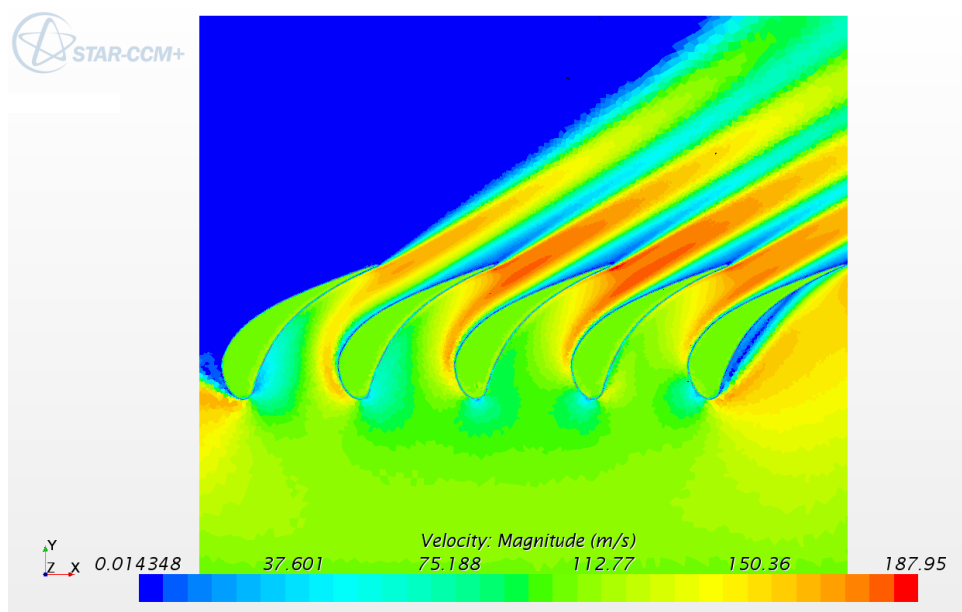


Рис.3 Поле скоростей потока при $t_0 = 800^\circ\text{C}$ (пористый тип охлаждения)

Охладитель, протекая через внутренние полости лопаток, выдавливается через поры и смешивается с основным потоком. На представленном поле скоростей потока можно увидеть, как вблизи выходных кромок лопаток аэродинамические следы расширяются (со стороны спинки лопаток, где давление ниже, чем на корытце) за счет выхода охладителя через поры. Чтобы численно оценить неоднородность скоростей в аэродинамических следах, были проведены замеры параметров потока по 20 линиям замеров за выходными кромками лопаток. На рис.4 показана пятая линия замеров, расположенная на расстоянии 2 мм от выходной кромки лопаток.

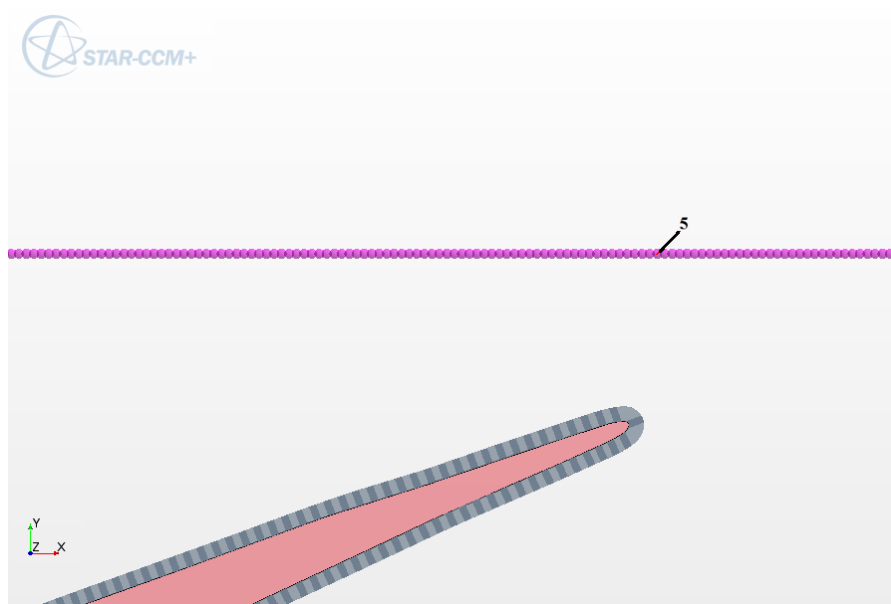


Рис.4 Линия замера параметров потока за выходными кромками лопаток

На рис.5 представлены графики скоростей потока (при $t_0 = 800^\circ\text{C}$) в аэродинамических следах, полученные по 5 линии замеров параметров для разных типов охлаждения лопаток.

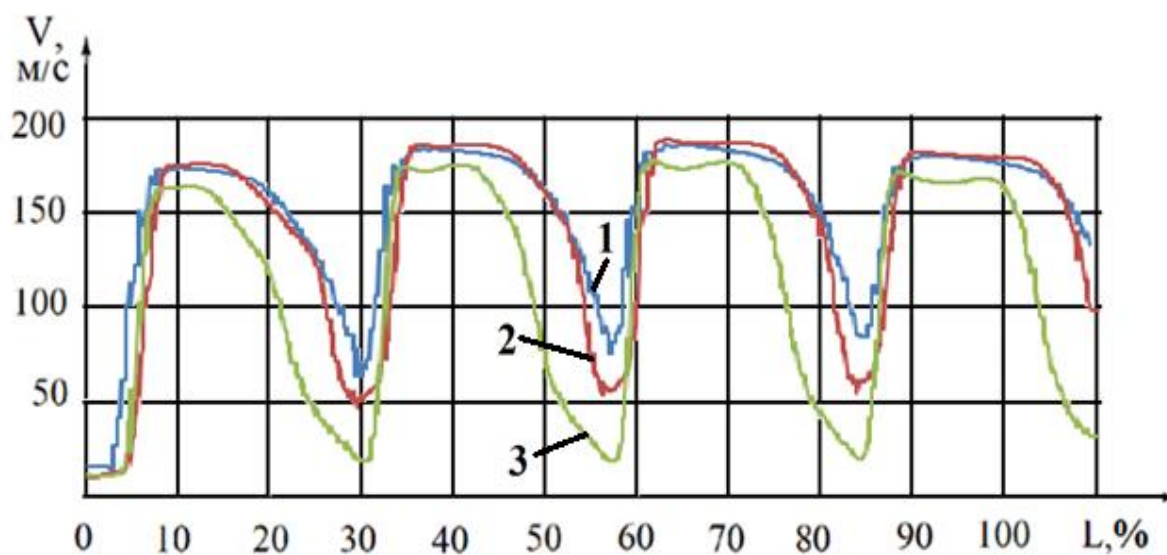


Рис.5 Сравнение графиков скоростей потока в аэродинамических следах при разных типах охлаждения лопаток.

1-конвективное охлаждение; 2-пленочное охлаждение;
3-пористое охлаждение

Если сравнить аэродинамические следы при пористом охлаждении с аналогичными следами при конвективном и пленочном охлаждении, то очевидно, что следы при пористом охлаждении наиболее широкие и дальше располагаются за выходными кромками лопаток вниз по потоку.

По итогам исследований в данном разделе можно сделать следующие выводы:

1. Пористый тип охлаждения существенно понижает температуру материала лопаток.

2. Неоднородность потока за сопловыми лопатками при пористом типе охлаждения существенно возрастает по сравнению с неоднородностью потока при пленочном или конвективном охлаждении.

Список литературы

[1] Федоров В.А., Мильман О.О., Шифрин Б.А. Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, с.116

[2] Лапин Ю.Д., Поварнев М.В. Проблемы внутреннего охлаждения лопаток высокотемпературной паровой турбины: сборник статей «Разра-

ботка научных основ проектирования электростанций с высокотемпературными паровыми турбинами» - изд. МГТУ, 2009, с.300

[3] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние пленочного охлаждения сопловых лопаток на аэродинамические следы «Научно-технологические инновации в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2016.

[4] Сидоров А.А., Киселев С.В. Исследование влияния высокой температуры и конструкции лопаток на динамические напряжения. – Сборник трудов региональной научно-технической конференции «Научно-технологические инновации в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2011.

[5] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние охлаждения сопловых лопаток высокотемпературной паровой турбины на неоднородность потока в кромочных следах за лопатками. – ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2011, сс.191-196.

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpoll@rambler.ru

Киселев Сергей Викторович – ассистент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SKV1985@yandex.ru

А. С. Голиков

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РАБОТЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В области экспериментального исследования турбомашин широкое распространение получили модели лопаточного аппарата из плоских решеток профилей [1,2] (рис.1).

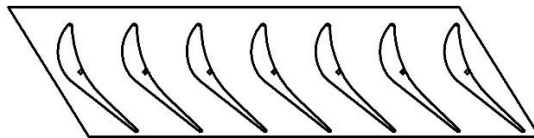


Рис. 1. Плоская решетка профилей

Однако большой проблемой является изготовление самих профилей.

Профили, изготовленные из металла, являются наиболее близкими по своим характеристикам к используемым в реальных лопатках, но и наиболее дорогими в изготовлении.

Профили, изготовленные из легких материалов (дерево, пенополистирол), могут удовлетворять условиям эксперимента, и более просты и дешевы в изготовлении, но также требуют наличие специального инструмента для их изготовления.

Кроме того, конструкция профиля не всегда позволяет изготовить его с достаточной точностью. На рис. 2 представлен профиль, изготовленный из дерева, который не сохраняет формы входной и выходной кромки.

Наиболее удачным способом изготовления был признан способ изготовления профиля из композиции целлюлозно-бумажного наполнителя и дисперсии ПВАД (ПВА) рис.4.

Преимуществами данного метода изготовления профиля являются:

1. Простота изготовления.
2. Доступность и дешевизна материала.
3. Высокое качество формы профиля.
4. Удовлетворительные прочностные характеристики.

Для дополнительного повышения качества поверхности может быть применено покрытие металлизированной пленкой.



Рис. 2 Профиль из дерева



Рис. 3. Эскиз заготовки для профиля

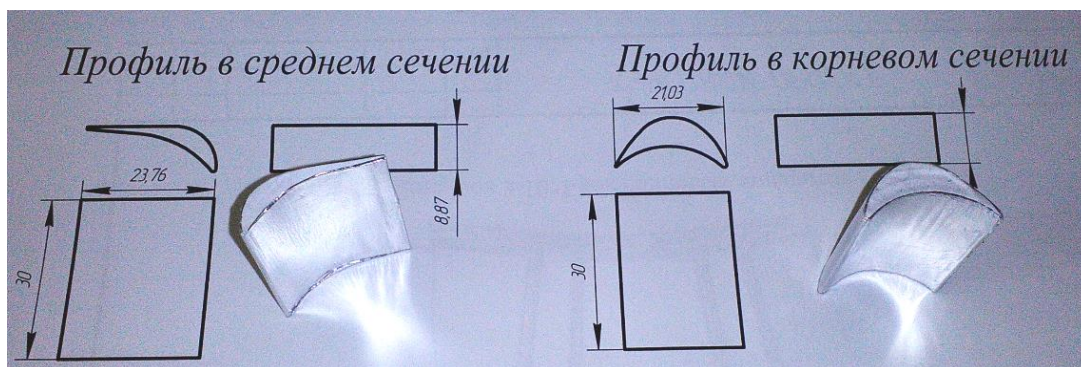


Рис. 4. Профиль из целлюлозно-бумажной композиции и дисперсии ПВАД

Список литературы

[1] Повх Н. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх Н. Л. – «Машиностроение», 1974. – 480 с.

[2] Самойлович Г. С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин / Самойлович Г. С. – М.: 1969 – 444 с.

Голиков Андрей Сергеевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: golickov.a.s@yandex.ru

А.Ф. Заричный, В.Ю. Ильичев

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА КОЛЕБАНИЙ РОТОРОВ, СОЕДИНЕННЫХ ЖЕСТКИМИ МУФТАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При создании роторных систем в турбоагрегатах применяются соединительные муфты, использование которых не должно приводить к превышению нормативного уровня вибрации. При этом на вибрацию сильно влияют конструктивные особенности муфт, их характеристики, главная из которых – способность муфт компенсировать неизбежные расцентровки осей валов и снижать степень взаимовлияния валов в роторной системе.

По принципу работы конструкции муфт можно разделить на жесткие и подвижные [1].

Жесткие муфты наиболее просты в изготовлении и компактны. В большинстве случаев они выполняются в виде двух хорошо пригнанных по плоскостям фланцев, скрепленных при помощи призонных болтов. Такая конструкция способна передавать высокий крутящий момент.

Подвижные соединительные муфты применяются для обеспечения относительных осевых смещений валов при их тепловых расширениях, в тех случаях, когда приводной механизм не допускает смещений ротора относительно статора, для компенсации расцентровок валов и для уменьшения взаимовлияния валов в роторных системах. Работа таких муфт рассматривалась в [2].

При жестком соединении валов роторная система превращается в статически неопределимый многоопорный валопровод, нагрузка на его опорные подшипники зависит не только, например, от веса ротора, но и от его жесткостных характеристик, податливости подшипниковых опор и фундаментных конструкций, а также от уровня их нагрева, тепловой стабильности и действующих на них сил.

Некоторые виды подвижных муфт при определенных условиях также могут вести себя как жесткое соединение, и компенсация расцентровок осуществляется только за счет деформации соединяемых валов.

Для оценки вибрационного состояния роторной системы с жестким соединением валов необходимо произвести расчет уровней динамических сил, возникающих из-за несоосности соединяемых валов.

Поскольку расцентровка осей валов является кинематическим возбудителем колебаний роторов, то силы и моменты, возникающие в месте соединения роторов, зависят от степени сопротивления роторов деформированию, т.е. от инерционно-жесткостных характеристик валов, входящих в роторную систему, и их опор.

Так как статические и динамические коэффициенты податливости концов отдельных валов не зависят от конструкции соединительной муфты, целесообразно вычислять эти коэффициенты отдельно для каждого вала, а затем уже их использовать при составлении уравнений для определения сил и моментов в месте соединения валов, с учетом особенностей конструкции соединительной муфты, а также величины и характера расцентровки осей.

Точность расчета будет зависеть, главным образом, от точности определения значений коэффициентов динамической податливости.

В результате должны быть получены следующие коэффициенты податливости концов валов [3]:

$\delta_p(\omega)$ – амплитудные значения смещения конца вала от действия единичного вектора силы;

$\theta_p(\omega)$ – фазовый угол между направлением единичного вектора силы и смещением конца вала $\delta_p(\omega)$;

$\delta_M(\omega)$ – амплитудные значения смещения конца вала от действия единичного момента;

$\theta_M(\omega)$ – фазовый угол между плоскостью действия единичного момента и плоскостью смещения конца вала $\delta_M(\omega)$;

$\phi_p(\omega)$ – амплитудные значения угла поворота конца вала от действия единичного вектора силы;

$\theta_{p\beta}(\omega)$ – фазовый угол между плоскостью действия единичного вектора силы и плоскостью угла поворота $\phi_p(\omega)$;

$\phi_M(\omega)$ – амплитудные значения угла поворота конца вала от действия единичного момента;

$\theta_{M\beta}(\omega)$ – фазовый угол между плоскостью действия единичного момента и плоскостью угла поворота конца вала $\phi_M(\omega)$.

При определении сил и моментов в месте соединения валов примем для упрощения решения задачи, что упругие свойства валов и опор изотропны и поэтому траекториями движения центров валов будут окружности. В действительности изотропными свойствами практически обладает только сам вал, опоры же анизотропны и могут иметь разные жесткостные и демпфирующие свойства в разных направлениях. Чтобы учесть влияние фактических характеристик опор и подшипников, не усложняя решения задачи, можно производить расчет, например, для двух значений коэффициентов податливости, – максимальных и минимальных или взять их средние значения [3].

Схема соединения валов с параллельно смещенными осями в вертикальной плоскости показана на рисунке 1.

Характерным для этой схемы является:

– расстояние между центрами валов постоянно: $O_1 O_2 = \Delta_y = const$.

- оба фланца муфты поворачиваются на одинаковый угол: $\beta_{x1} = \beta_{x2}$.
Примем, что вал № 1 является более жестким, чем вал № 2.

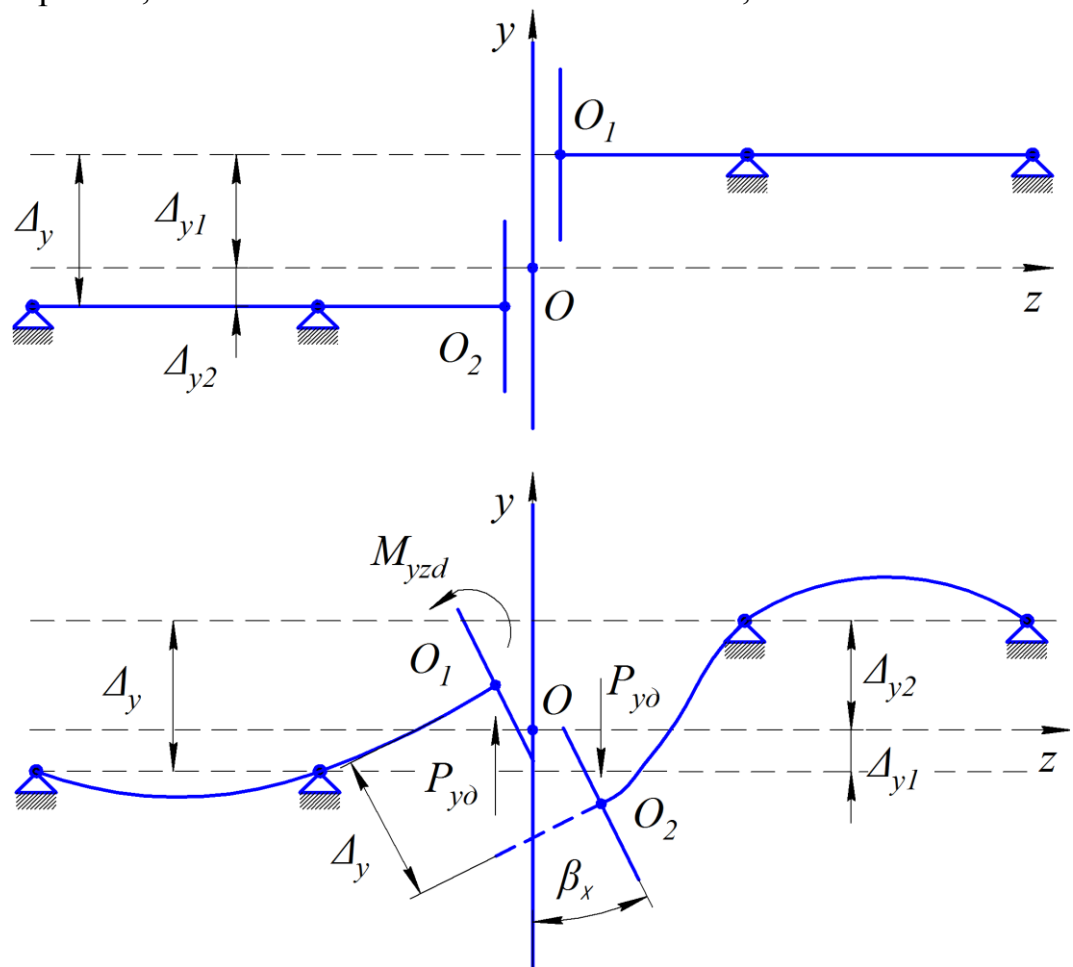


Рис. 1. Валы с параллельно смещенными осями

Поскольку принято, что система валов изотропна, то при вращении валов их центры O_1 и O_2 движутся по окружностям с центром в точке O .

Введем следующие обозначения:

Δ_y – параллельное смещение осей валов;

P_{yc} – постоянная сила, действующая в вертикальной плоскости yz ;

M_{yzc} – постоянный момент, действующий в вертикальной плоскости yz ;

$P_{y\delta}$ и $P_{x\delta}$ – переменные силы, действующие в вертикальной (yz) и в горизонтальной (xz) плоскостях;

$M_{y\delta}$ и $M_{x\delta}$ – переменные моменты, действующие в вертикальной (yz) и в горизонтальной (xz) плоскостях.

Силы и моменты P_{yc} , M_{yzc} , $P_{y\delta}$, $P_{x\delta}$, $M_{y\delta}$, $M_{x\delta}$ можно вычислить по выведенным формулам

$$\left. \begin{aligned} P_{yc} (\delta_{02P} + \delta_{01P}) - M_{yzc} (\delta_{02M} + \delta_{01M}) &= \Delta_y, \\ P_{yc} (\phi_{02P} - \phi_{01P}) - M_{yzc} (\phi_{02M} + \phi_{01M}) &= 0, \\ a_1 P_{y\dot{\delta}} - b_1 P_{x\dot{\delta}} - c_1 M_{yz\dot{\delta}} + d_1 M_{xz\dot{\delta}} &= -\Delta_y \cos \omega t, \\ b_1 P_{y\dot{\delta}} + a_1 P_{x\dot{\delta}} - d_1 M_{yz\dot{\delta}} - c_1 M_{xz\dot{\delta}} &= \Delta_y \sin \omega t, \\ a_2 P_{y\dot{\delta}} - b_2 P_{x\dot{\delta}} - c_2 M_{yz\dot{\delta}} + d_2 M_{xz\dot{\delta}} &= 0, \\ b_2 P_{y\dot{\delta}} + a_2 P_{x\dot{\delta}} - d_2 M_{yz\dot{\delta}} - c_2 M_{xz\dot{\delta}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \delta_{2P} \cos \theta_{2P} + \delta_{1P} \cos \theta_{1P}; a_2 = \phi_{2P} \cos \theta_{2P\beta} - \phi_{1P} \cos \theta_{1P\beta}; \\ b_1 &= \delta_{2P} \sin \theta_{2P} + \delta_{1P} \sin \theta_{1P}; b_2 = \phi_{2P} \sin \theta_{2P\beta} - \phi_{1P} \sin \theta_{1P\beta}; \\ c_1 &= \delta_{2M} \cos \theta_{2M} - \delta_{1M} \cos \theta_{1M}; c_2 = \phi_{2M} \cos \theta_{2M\beta} + \phi_{1M} \cos \theta_{1M\beta}; \\ d_1 &= \delta_{2M} \sin \theta_{2M} - \delta_{1M} \sin \theta_{1M}; d_2 = \phi_{2M} \sin \theta_{2M\beta} + \phi_{1M} \sin \theta_{1M\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для определения значений $P_{y\dot{\delta}}$, $P_{x\dot{\delta}}$, $M_{yz\dot{\delta}}$ и $M_{xz\dot{\delta}}$ при заданном значении ω , и их фазовых соотношения, решения следует находить в виде $P = P_1 \cos \omega t + P_2 \sin \omega t$ и $M = M_1 \cos \omega t + M_2 \sin \omega t$. Подставив эти зависимости в систему уравнений (1) и сгруппировав выражения при $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$, получим уравнения для нахождения всех значений P_i и M_i .

Проведенные исследования показали, что при жестком соединении валов расцентровка осей приводит к возникновению переменных сил и моментов, меняющихся с частотой вращения ω . Задаваясь различными значениями угловой скорости, можно найти критическую скорость составного ротора.

Список литературы

[1] Диментберг Ф.М., Колесников К.С. Вибрации в технике. Т. 3: *Колебания машин, конструкций и их элементов*. Москва, Машиностроение, 1980, 544 с.

[2] Ильичев В.Ю. Заричный А.Ф. *Методика определения жесткости резиновых элементов втулочно-пальцевых муфт*. Журнал: Проблемы современной науки и образования, Олимп, 2016, 107 с.

[3] Ильичев В.Ю. *Исследование влияния конструкции соединительных муфт на динамику роторных систем турбоагрегатов*. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., электронный ресурс <http://elibrary.ru/item.asp?id=19184609>

Заричный Александр Федорович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sefank790@ya.ru

Ильичев Владимир Юрьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

К ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОГО ДИАПАЗОНА МОЩНОСТИ МИКРО ТЭЦ НА БАЗЕ МИКРОТУРБИНЫ ОБРАЩЕННОЙ ОЧЕРЕДНОСТИ ПРОЦЕССОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение.

Обеспечение тепловой и электрической энергией индивидуальных жилых домов и таунхаусов, малых офисных и складских помещений возможно с помощью когенерационных установок малой мощности (микро ТЭЦ). Разнообразие потребителей тепловой и электрической энергии для объектов распределенной энергетики предполагает широкий диапазон изменения основных параметров микро ТЭЦ. В табл. 1 приведены примерные диапазоны потребной электрической $N_{эл}$ и тепловой $N_{тепл}$ мощности микро ТЭЦ для различных регионов РФ. Данные по тепловой нагрузке определены по [1,2], величина электрической нагрузки определена по статистическим показателям [3].

Таблица 1. Параметры микро ТЭЦ для энергоснабжения обособленных потребителей

	Отапливаемая площадь, м ²	$N_{эл}$, кВт	$N_{тепл}$, кВт		
			Южные регионы	Центральный регион	Северные регионы
Индивидуальные жилые дома	200...250	3...5	15...25	30...35	45...70
Двух-трехквартирные таунхаусы	450...600	9...15	20...30	45...60	50...75
Складские помещения	800...1200	5...10	40...60	80...100	100...120

В настоящее время на рынке энергетических установок представлены когенерационные установки малой мощности на базе поршневых ДВС, двигателей Стирлинга и на топливных элементах. В табл. 2 указаны характерные параметры предлагаемых на рынке микро ТЭЦ, [4].

Таблица 2. Характерные параметры предлагаемых на рынке микроТЭЦ

Тип силовой установки	Электрическая мощность $N_{эл}$, кВт	Тепловая мощность $N_{тепл}$, кВт	Удельная выработка тепла $N_{тепл} / N_{эл}$
ДВС (Ecopower/Spilling Energie)	1,3...4,7	4,0...12,5	2,5...3
	7...20	12...40	
Топливные элементы	0,75...1,0	1...1,5	1...1,5
Двигатель Стирлига	1-6	5...36	5...6
Газовая микротурбина Capstone C30/C60	15...60	70...300	4,5...5

Сравнивая данные, представленные в табл. 1 и 2, можно сделать заключение, что для указанных категорий обособленных потребителей в климатических условиях северных и центральных регионов РФ с задачей обогрева способны справиться микро ТЭЦ на базе газовых микротурбин, однако при достаточной теплопроизводительности, их характеризует избыточная электрическая мощность. Создание микро ТЭЦ с газовыми микротурбинами с меньшей электрической мощностью проблематично из-за малого потребного расхода циклового воздуха и, следовательно, малых размеров проточной части, сложности организации надежного процесса горения в малоразмерной камере сгорания, чрезвычайно высоких оборотов ротора [5].

Другие, коммерчески реализованные микро ТЭЦ с $N_{эл}=3...5$ кВт на базе ДВС и др., не способны самостоятельно обеспечить теплоснабжение указанных в табл. 1 категорий обособленных потребителей тепловой и электрической энергии в условиях холодного климата России.

Обеспечение потребностей в тепле и электричестве указанных потребителей возможно с помощью микро ТЭЦ на базе газовых микротурбин с измененной очередностью процессов (Рис. 1). Принцип работы данной схемы описан в [6].

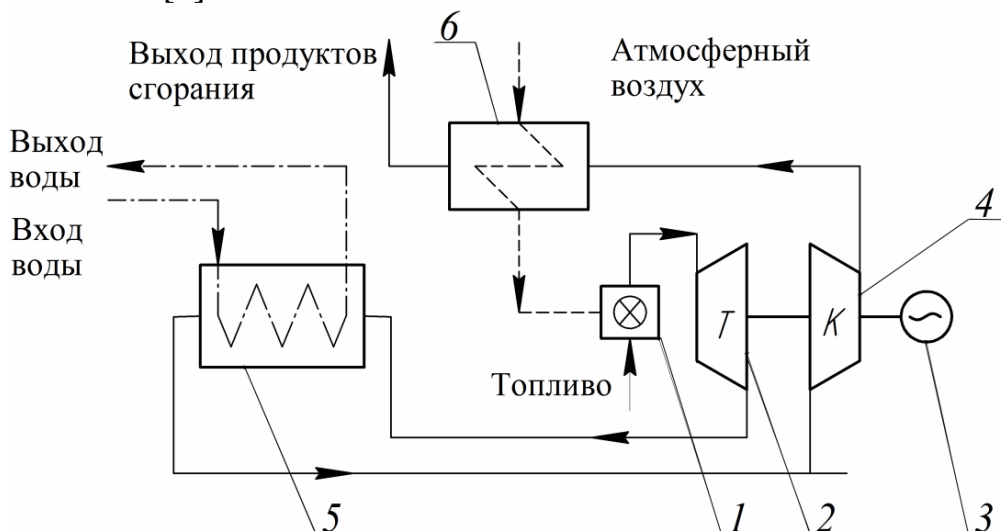


Рис. 1. Схема микро ТЭЦ с микротурбиной измененной очередности процессов и экономайзером:

- 1 – атмосферная горелка; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – компрессор; 5 – газодводящий теплообменный аппарат; 6 – экономайзер

Постановка задачи.

Разнообразие потребителей тепловой и электрической энергии, в рамках малой распределенной энергетики, наводит на необходимость проведения анализа возможного диапазона вырабатываемой тепловой и электрической мощности микро ТЭЦ на базе микротурбин измененной очередности процессов.

Мощность газотурбинной установки (ГТУ) определяется как:

$$N_e = l_e \cdot G_{\text{возд}}, \quad (1)$$

где l_e – удельная работа цикла; $G_{\text{возд}}$ – расход воздуха в цикле.

Увеличение удельной работы цикла l_e , а, следовательно, и мощности ГТУ, возможно увеличением начальной температуры газа T_3 . Однако, величина T_3 ограничена условиями прочности и видом применяемого материала, и для неохлаждаемых турбин составляет величину $T_3=1050\dots1100\text{K}$ [7].

Допустимый диапазон изменения расхода воздуха в цикле определяется конструктивным решением турбоустановки и микро ТЭЦ в целом. Если ориентироваться на отработанные технологии автомобильных турбокомпрессоров (ТКР) [8], то возможный диапазон изменения расхода воздуха можно принять от 0,075 до 0,25 кг/с.

Мощность микро ТЭЦ можно поднять посредством повышения эффективности элементов турбоустановки, а именно η_k и η_t – КПД компрессора и турбины соответственно. Суммарная величина потерь полного давления в газоздушном тракте микро ТЭЦ σ_Σ так же влияет на величину l_e .

Для оценки диапазона мощности и максимальной эффективности микро ТЭЦ предложенной схемы были произведены вариантыные расчеты термодинамического цикла с помощью приложения GateCycle [9]. Основные исходные данные приведены в табл.3. В табл.3 обозначены: π_t – степень понижения давления газа в цикле; η_k и η_t – КПД компрессора и турбины; Δt_{TA} – температурный напор в газовой теплообменной аппаратуре; σ_Σ – суммарный коэффициент восстановления полного давления в цикле.

Таблица 3. Основные исходные данные для расчета микро ТЭЦ

Вариант	π_t	η_k	η_t	T_3, K	$\Delta t_{TA}, \text{K}$	σ_Σ
1	2,4	0,75	0,75	950	10	0,96
2		0,78	0,78	1050	7	0,96

Параметры микро ТЭЦ по варианту 1 были выбраны, ориентируясь на характеристики серийных ТКР. Параметры по варианту 2 – учитывая современный уровень развития турбомашин малой размерности.

Каждый из вариантов рассчитывался как для работы на традиционную отопительную систему с параметрами прямой/обратной воды 80/60°C, так и на низкотемпературную с параметрами теплоносителя 50/30°C. Показатели цикла определены при степени понижения давления в турбине $\pi_t=2,4$,

при которой достигается оптимальное сочетание эффективности, ресурса и отношения $N_{\text{тепл}}/N_{\text{эл}}=10\dots23$ [6].

При определении электрической мощности микро ТЭЦ был дополнительно учтен КПД преобразования механической энергии в электрическую $\eta_{\Gamma}=0,91$ (КПД электрогенератора).

Результаты расчета.

На Рис. 2 и Рис. 3 показаны графики изменения электрической мощности $N_{\text{эл}}$ и тепловой мощности $N_{\text{тепл}}$ в зависимости от расхода воздуха в диапазоне характерном для автомобильных ТКР.

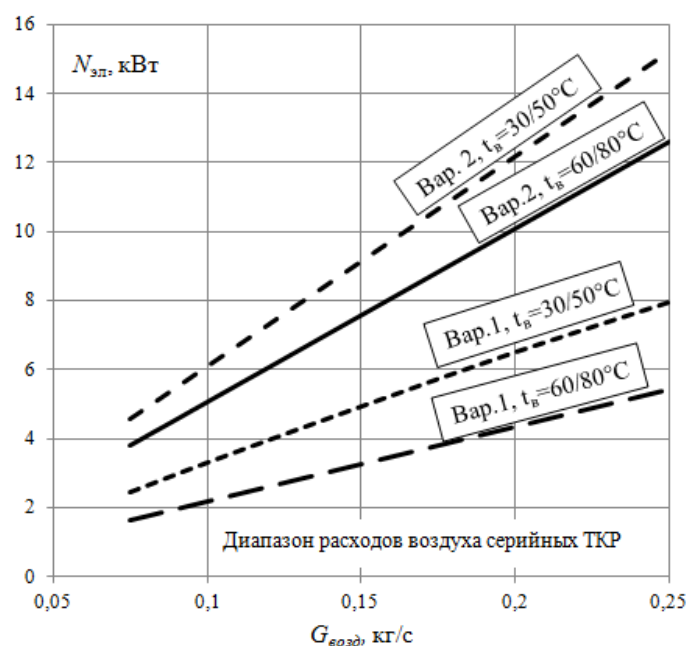


Рис. 2. Диапазон изменения электрической мощности микро ТЭЦ

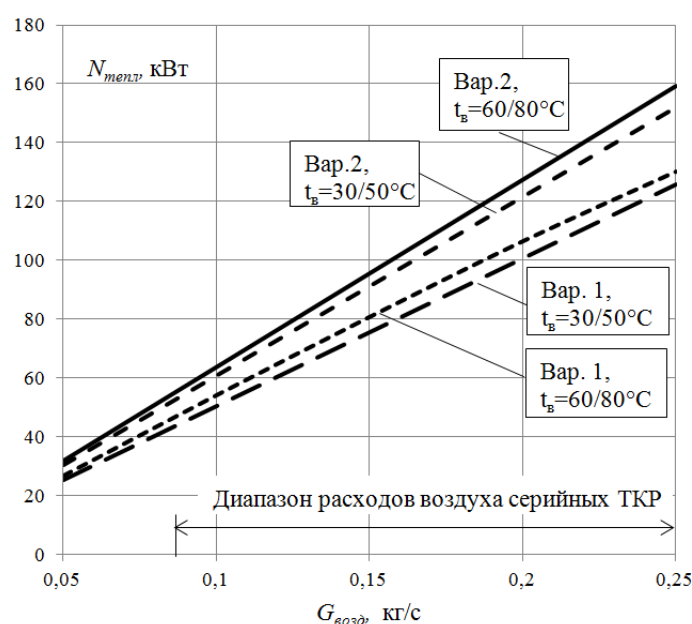


Рис. 3. Диапазон изменения тепловой мощности микро ТЭЦ

Согласно графикам, представленным на Рис. 2 и Рис. 3, можно сделать вывод, что оставаясь в типоразмере автомобильных ТКР, для микро ТЭЦ по вар.1 вырабатываемая электрическая мощность микро ТЭЦ $N_{эл}=1,6...8$ кВт, тепловая $N_{тепл}=38...130$ кВт, для микро ТЭЦ по вар.2 – $N_{эл}=4...15$ кВт, $N_{тепл}=46...160$ кВт. Полученные значения удовлетворяют требованиям категорий обособленных потребителей тепловой и электрической энергии представленных в табл.1.

Заключение.

На основании проведенных исследований получены возможные параметры микро ТЭЦ на базе микротурбины измененной очередности процессов (табл. 4).

Таблица 4. Диапазоны мощности микро ТЭЦ

параметр микроТЭЦ	низкотемпературная система отопления	традиционная система отопления
электрическая мощность $N_{эл}$, кВт	2,5...160	1,6...12,6
тепловая мощность $N_{тепл}$, кВт	40...160	38...152
электрический КПД, %	5,2..8	3,6...7
коэффициент использования теплоты топлива, %	88...90	

Сопоставляя результаты табл. 4 и 1, можно сделать вывод, что параметры микроТЭЦ на базе микротурбины измененной очередности процессов достаточны для энергообеспечения таких массовых категорий обособленных потребителей как индивидуальные жилые дома, таунхаусы, малые складские помещения.

Список литературы

- [1] СНиП 23-01 «Строительная климатология», НИИСФ, 1999 г.
- [2] СНиП 23-02 «Тепловая защита зданий», НИИСФ, 1999 г.
- [3] Сайт общественного проекта «ГОС ЖКХ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://gosjkh.ru/>
- [4] Сафонов А.И., Липихин Е.Г., Шевелев Д.В. Обзор состояния рынка когенерационных установок малой мощности. Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. №11-1, 2016, с. 94-99. <http://elibrary.ru/item.asp?id=27238340>
- [5] W. P. J. Visser, S. Shakariyants, M.T.L. de Later. Performance optimization of a 3kw microturbine for chp applications (Исследование и оптимизация микротурбины, мощностью 3 кВт для микроТЭЦ), Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, June 11-15, 11 p.
- [6] Липихин Е.Г., Шевелев Д.В. Исследование термодинамической эффективности микроТЭЦ с газовой микротурбиной измененной очередности процессов. Инженерный журнал: наука и инновации. №10(58)/2016 DOI: 10.18698/2308-6033-2016-10-1547

[7] Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. -2-е изд. – М.: Наука, 2006. – 632 с.

[8] ГОСТ Р 53637-2009 Турбокомпрессоры автотракторные. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2010, 12 с.

[9] GateCycle, General Electric, [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <https://getotalplant.com/GateCycle/docs/GateCycle/index.html> (Дата обращения 4.03.16).

Липихин Евгений Геннадьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

П.М. Сидоров, П.М. Сидоров, Д.В. Шевелев

ПРИКЛАДНАЯ ПРОГРАММА «РАСЧЕТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ» ДЛЯ ОС СЕМЕЙСТВА WINDOWS

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рост цен на энергоносители (электричество, газ, централизованное теплоснабжение) делает актуальной задачу повышения энергоэффективности существующих зданий и сооружений. Это возможно осуществить нанесением на наружные поверхности стен дополнительной теплоизоляции – базальтовых плит, экструдированного пенополистирола, жидкого пенополиуретана и пр.

Для организаций, занимающихся продажей и нанесением теплоизоляционных материалов, важной является задача определения необходимой толщины теплоизоляционного материала, при которой величина потерь тепла уменьшится на заданную клиентом величину. Для ее решения требуется проведение теплотехнического расчета. Исходными данными для расчета являются:

- геометрические и теплофизические характеристики стены – толщина δ_i , мм и теплопроводность материала λ_i , Вт/(м·К) слоев);
- площадь наружной поверхности стены, F , м²;
- температура воздуха внутри помещения $t_{\text{вн}}$, °С;
- температура атмосферного воздуха $t_{\text{нар}}$, °С;
- желаемая величина снижения теплопотерь через стены, δ %;
- свойства теплоизоляционного материала (теплопроводность $\lambda_{\text{из}}$ Дж/(м·К), плотность $\rho_{\text{из}}$, кг/м³).

Упрощенная методика такого расчета, имеющая достаточную для применения на практике точность, была описана ранее в [1]. На основе этой методики, в среде программирования Delphi [2], для операционных систем семейства Windows была создана прикладная программа «Расчет теплоизоляции плоских поверхностей», позволяющая упростить и ускорить теплотехнические расчеты по определению требуемого количества теплоизоляции. Для работы с данной программой, пользователю не требуется специальных знаний в области термодинамики и теории теплообмена, что повышает ее практическую ценность.

Структурно, программа состоит из двух модулей. Блок-схема программы представлена на рис. 1.

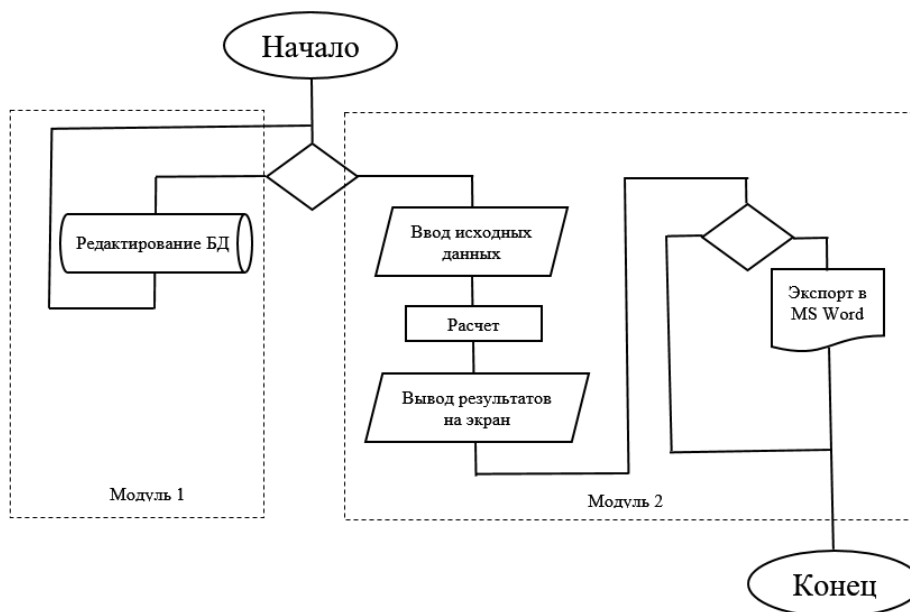


Рис. 1. Блок-схема программы

Первый модуль предназначен для редактирования баз данных.

Базы данных содержат температуру воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 для различных регионов РФ [3], и коэффициент теплопроводности различных типов конструкционных и теплоизоляционных материалов [4]. Работа с базами данных осуществляется по технологии ADO (ActiveDataObject), формат выбран стандартный для MSAccess – .mdb. Доступ к базам данных осуществляется через драйвер «MicrosoftJetOLEDBProvider» который устанавливается по умолчанию во всех последних версиях операционных систем MSWindows. Вкладка окна программы, предназначенная для работы с базами данных, представлена на рис. 2.

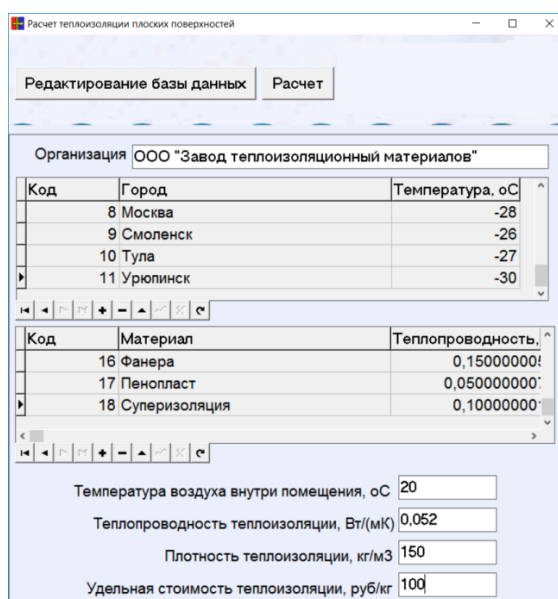


Рис. 2. Вкладка «Редактирование базы данных»

Кроме редактирования баз данных, здесь также осуществляется ввод используемых при расчете:

- температуры воздуха внутри помещений ($t_{нар}$, °C), которая задается пользователем или принимается нормированной по [5,6];
- теплопроводность ($\lambda_{из}$, $\frac{Вт}{м^2К}$), плотность ($\rho_{из}$, $\frac{кг}{м^3}$) и удельная стоимость ($c_{из}$, $\frac{руб}{кг}$) наносимой дополнительной теплоизоляции.

Кроме того, возможен ввод наименования и контактных данных организации.

Второй модуль программы – расчетный. Здесь вводятся исходные данные для конкретного расчета. Вкладка окна программы для ввода параметров расчета предоставляемых пользователем приведена на рис. 3.

Рис. 3. Вкладка «Ввод исходных данных»

Во вкладке «Расчет» сначала из выпадающего списка выбирается регион, затем указывается общая площадь теплоизолируемой поверхности (стены), количество окон, площадь окна, количество конструктивных слоев стены. Далее задается структура каждого слоя стены – материал выбирается из выпадающего списка, толщина слоя вводится с клавиатуры. После этого нужно задать желаемую величину снижения теплопотерь через стену и нажать кнопку «Расчет» в нижней части окна.

Результат расчета выводится в окне программы в виде таблицы (рис. 4).

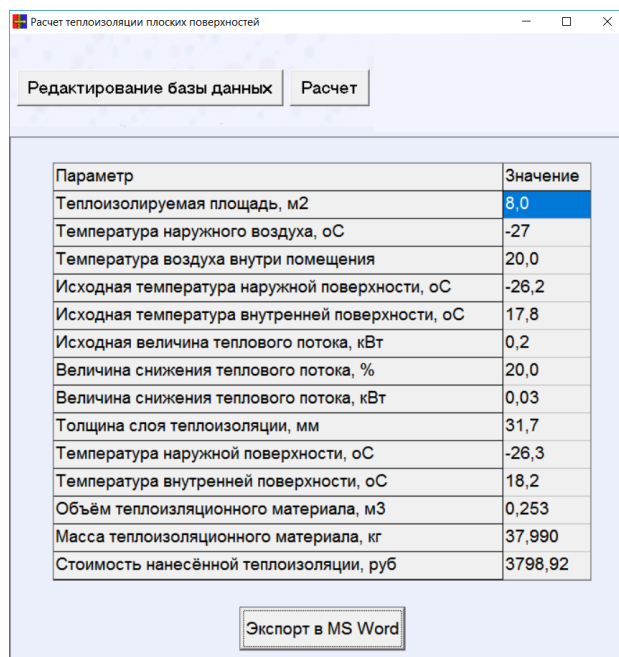


Рис. 4. Результаты расчета

Результаты расчета можно экспортировать в MSWord для последующей печати нажав кнопку «Экспорт в MSWord» под таблицей с результатами расчета. При этом происходит автоматическое формирование бланка сметы, пример которой приведен на рис. 5.

ООО "Завод теплоизоляционный материалов"
г. Калуга, ул. Кирова, 158, офис 345.
Тел. (04842) 11-11-11. E-mail: teplotz@mail.ru

СМЕТА

Параметр	Значение
Теплоизолируемая площадь, м ²	8,0
Температура наружного воздуха, оС	-27
Температура воздуха внутри помещения	20,0
Исходная температура наружной поверхности, оС	-26,2
Исходная температура внутренней поверхности, оС	17,8
Исходная величина теплового потока, кВт	0,2
Величина снижения теплового потока, %	20,0
Величина снижения теплового потока, кВт	0,03
Толщина слоя теплоизоляции, мм	31,7
Температура наружной поверхности, оС	-26,3
Температура внутренней поверхности, оС	18,2
Объём теплоизоляционного материала, м ³	0,253
Масса теплоизоляционного материала, кг	37,990
Стоимость нанесённой теплоизоляции, руб	3799

Рис. 5. Пример бланка сметы

Разработанная прикладная программа позволяет определить температуру наружной и внутренней поверхностей стены, величину снижения теплового потока, толщину слоя теплоизоляции, ее объем, массу, стоимость и может быть рекомендована для практического применения организациям занимающимся продажей и нанесением теплоизоляционных материалов.

Список литературы

[1] Сидоров П.М., Сидоров П.М., Шевелев Д.В. К расчету дополнительной теплоизоляции наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. - № 11 (4). – С. 44-46.

[2] Осипов Д.Л. Delphi. Программирование для Windows, OS X, iOS и Android. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 464 с.

[3] Строительные нормы и правила: СНиП 23-01-99. Строительная климатология. В ред. Изменения №1, принятого Постановления Госстроя РФ от 24.12.2002 №164: нормативно-технический материал. – Москва: [б.и.], 2002. – 77 с.

[4] СП 23-101-2004 «Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий».

[5] ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

[6] Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

Сидоров Павел Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPawel95@yandex.ru

Сидоров Петр Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPM@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Н.В. Гридчин, Н.Э. Емельянов, Я.В. Афанасов

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Разработка элементов газотурбинных двигателей (ГТД) характеризуется высокой трудо- и ресурсоемкостью. Одной из наиболее ответственных задач при проектировании является расчет и построение универсальных характеристик компрессора в виде зависимостей $\pi_k^* = f(G_{в0}; n_0)$, $\eta_k^* = f(G_{в0}; n_0)$, которые используют при написании программ САР и эксплуатационных рекомендаций. Они позволяют прогнозировать поведение ГТД при отклонении от расчетных значений частоты вращения компрессора n и параметров воздуха на входе p_n и T_n , что характерно для процесса эксплуатации ГТД. На рисунке 1 представлены типовые характеристики центробежного компрессора.

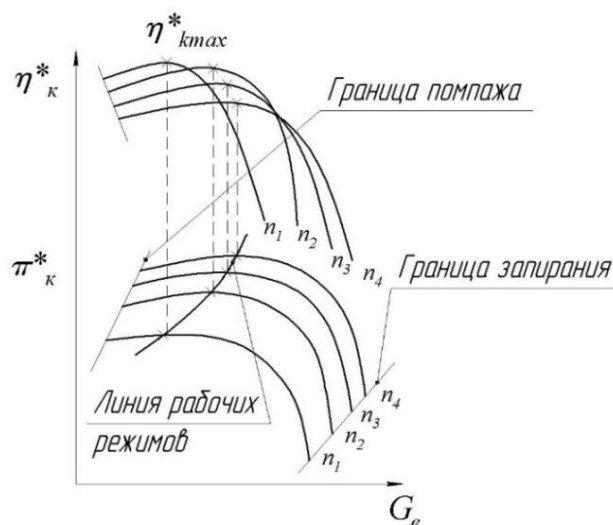


Рис. 1. Типовые характеристики центробежного компрессора (ЦБК)

Точность расчетных методов определения характеристик компрессоров из-за трудностей теоретического анализа изменения основных параметров на нерасчетных режимах часто не отвечает потребностям практики. Поэтому наиболее надежным способом получения характеристик является определение их при испытании компрессоров на специальных стендах. Однако изготовление опытных образцов колес компрессоров, требует значительных экономических и трудовых затрат и включает в себя: разработку и корректировку конструкторской документации, разработку технологического процесса, изготовление наладок и т.д.

Одним из способов удешевления процесса экспериментального получения характеристик ГТД является применение аддитивных технологий (AM – Additive Manufacturing), или технологий послойного синтеза.

Аддитивные технологии производства позволяют послойно изготавливать детали любой конфигурации, заданные 3D-моделью. В отличие от традиционного производства, где имеется заготовка, от которой в процессе обработки удаляется все лишнее или она деформируется. В случае с AM-технологиями из аморфного расходного материала выстраивается новое изделие. Процесс получения таких деталей так же называют 3D-печатью.

Сегодня эта технология – одно из наиболее динамично развивающихся направлений производства. Она позволяет на порядок ускорить НИОКР и решение задач подготовки производства.

В данной работе была рассмотрена возможность применения аддитивных технологий при проектировании малорасходных рабочих колес (РК) центробежного компрессора, что включило в себя: расчет трех вариантов РК ЦБК, подбор материала, изготовление колес методом послойного синтеза, постобработку поверхностей РК, модернизацию испытательного стенда, снятие характеристик РК и нахождение их предела прочности.

В исследовании были охвачены три основных группы радиальных РК ЦБК, характеризующиеся различными степенями реактивности, а именно:

- Реактивные РК, угол лопаток на выходе ($\beta_{2л} < 90^\circ$);
- Радиальное РК, угол лопаток на выходе ($\beta_{2л} = 90^\circ$);
- Активные РК, угол лопаток на выходе ($\beta_{2л} > 90^\circ$).

Для изготовления образцов были созданы 3D модели каждого из перечисленных типов (рис.2), с заданным припуском на механическую обработку. Основные геометрические параметры РК, представлены ниже:

$d_1 = d_0 = 39$ мм - диаметр входа;

$D_2 = 132$ мм - диаметр выхода;

$b_1 = 12$ мм - высота лопатки на входе в колесо;

$b_2 = 8$ мм - высота лопатки на выходе из колеса.

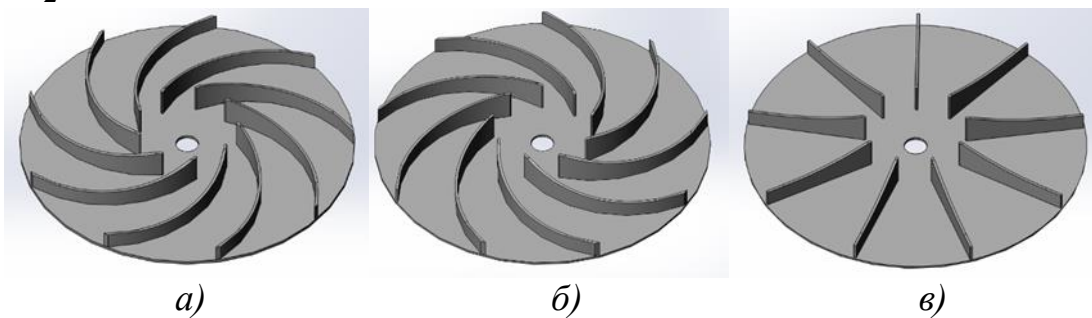


Рис. 2. Модели рабочих колес: а – реактивное ($\beta_{2л} < 90^\circ$), б – активное ($\beta_{2л} > 90^\circ$), в – радиальное ($\beta_{2л} = 90^\circ$)

Печать производилась на 3D принтере Mankati Fullscale XT. Допуск размеров и формы профиля, изготавливаемых на данном принтере моделей составляет 0,015 мм, а разрешение тонкостенных оболочек от 0,4 мм. В качестве материала моделей, исходя из рабочих температур и нагрузок на РК, был выбран пластик ABS (таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики ABS-пластика

Температура плавления	Около 105°С
Прочность на изгиб	41 МПа
Предел прочности на разрыв	22 МПа
Модуль упругости при растяжении	1627 МПа
Относительное удлинение	6%
Плотность материала	Около 1,05 г/см ³

После изготовления все модели (рис. 3) были подвергнуты механической обработке в целях улучшения качества рабочих поверхностей. Это связано с особенностями процесса печати, которые не позволили получить необходимую величину шероховатости поверхности проточной части.

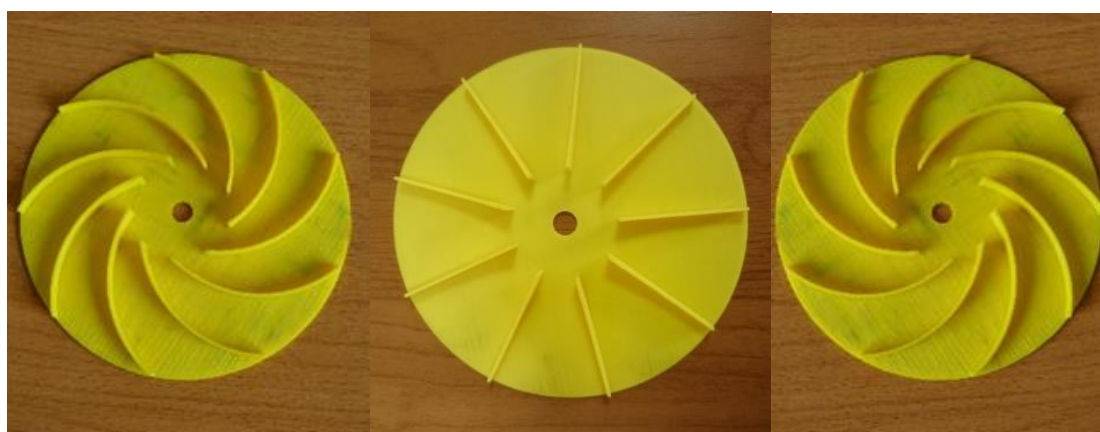


Рис. 3. Исследуемые образцы рабочих колес

В процессе эксперимента ставились следующие задачи:

- Провести испытания компрессора для различных частот вращения при изменении расхода воздуха;
- Рассчитать по рекомендуемой методике параметры, используя замеренные величины, и построить характеристики в приведенных параметрах $\pi_k^* = f(G_{в0}; n_0)$, $\eta_k^* = f(G_{в0}; n_0)$.

Испытания проводились на экспериментальном стенде «Ступень центробежного компрессора», конструктивная схема которого представлена на рисунке 4.

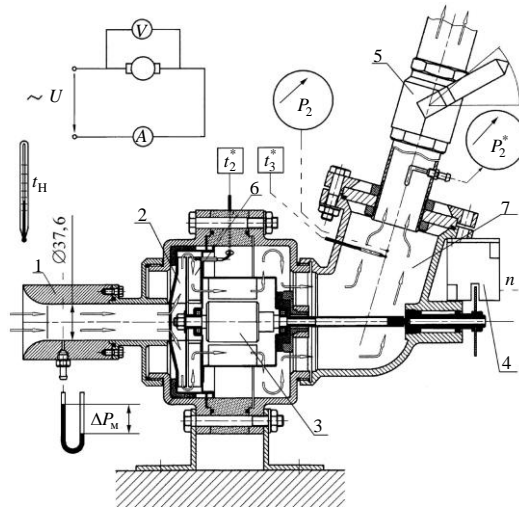


Рис. 4. Схема стенда "Ступень центробежного компрессора":
 1—входное устройство; 2—рабочее колесо; 3—электродвигатель; 4—датчик тахометра; 5—дрессель; 6—обратный радиальный направляющий аппарат; 7—выходная емкость

По полученным результатам эксперимента были сняты и проанализированы характеристики всех трех типов рабочих колес. Полученные зависимости представлены на рисунках 5...7.

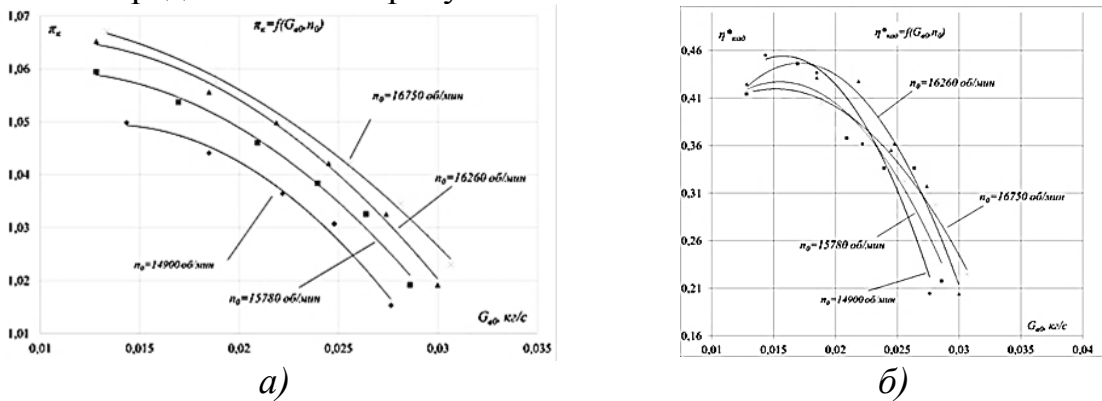


Рис. 5. Зависимости степени повышения давления π_k^* и адиабатного КПД в компрессоре от приведенного расхода воздуха $G_{в0}$ (реактивное РК)

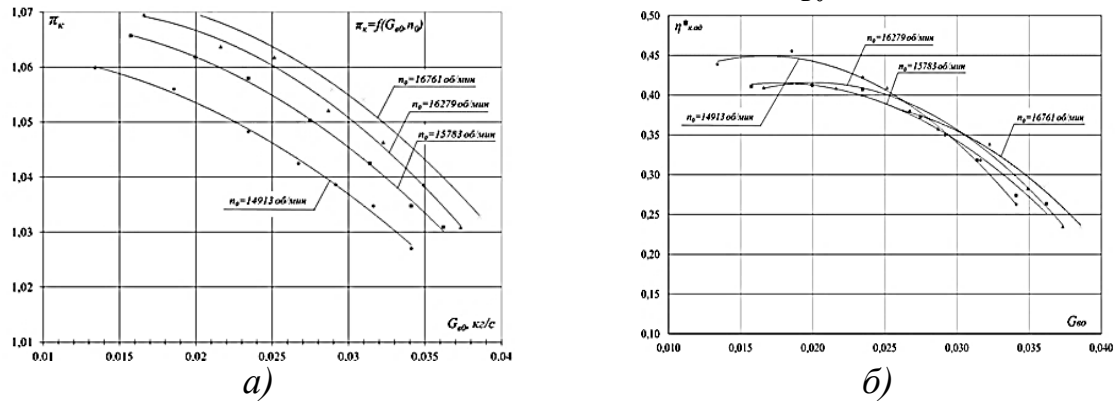


Рис. 6. Зависимости степени повышения давления π_k^* и адиабатного КПД в компрессоре от приведенного расхода воздуха $G_{в0}$ (радиальное РК)

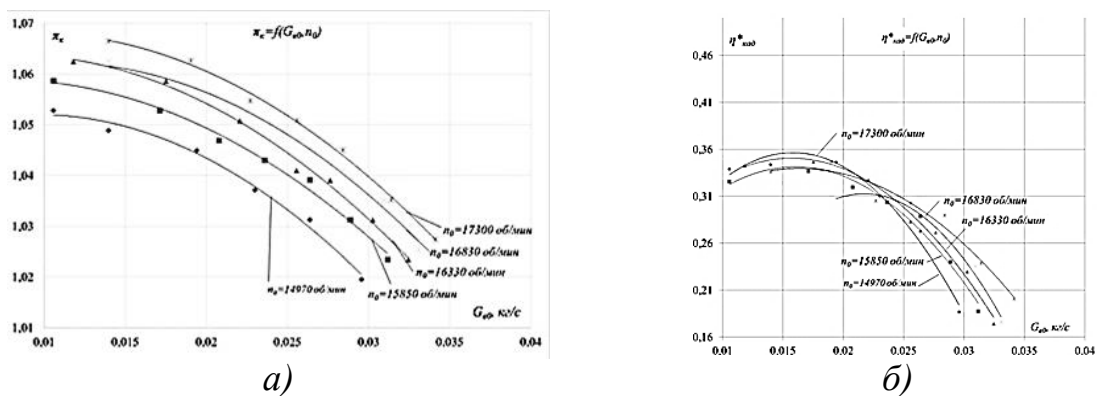


Рис. 7. Зависимости степени повышения давления π_k^* и адиабатного КПД в компрессоре от приведенного расхода воздуха $G_{в0}$ (активное РК)

Анализ полученных результатов показал удовлетворительную сходимость с результатами, полученными в ходе теоретических расчетов; образцы РК изготовленных методом послойного синтеза доказали свою работоспособность во всем диапазоне требуемых рабочих частот вращения ротора в ходе проведения экспериментов. Таким образом, применение современных технологий 3D печати может позволить значительно ускорить и удешевить процесс испытания и прототипирование образцов новых РК компрессоров ГТД.

Список литературы

- [1] Батурин О.В. Экспериментальное определение характеристик малоразмерных лопаточных машин: учеб. Пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006, 128 с.
- [2] Ржавин Ю.А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет: Учебник. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 344 с.
- [3] Расчет и проектирование центробежного компрессора ГТД /А.М. Ладошин, Н.В. Гридчин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008 – 22 с.
- [4] Холщевников К. В., Емин О. Н., Митрохин В. Т., Теория и расчет авиационных лопаточных машин: Учебник для студентов вузов по специальности "Авиационные двигатели". 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1986. 432 с.,ил.
- [5] Кулагин, В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн.2/ В.В. Кулагин. - М.: Машиностроение, 2013 – 280 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=37010

Гридчин Николай Викторович – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Емельянов Николай Эдуардович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: emelyanov92-mail@yandex.ru

Афанасов Ян Валерьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Xoncu@yandex.ru

Е.В. Тарасов, А.А. Жинов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ТЕПЛОБМЕННЫМИ АППАРАТАМИ СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Возможность применения бездеаэрационных тепловых схем рассматривается уже на протяжении нескольких десятилетий [1, 2, 3]. Такие схемы исключают применение отдельного деаэратора, за счет использования контактной системы регенерации, включающей в себя смешивающие подогреватели (СП) питательной воды, которые одновременно выполняют функции деаэратора.

В КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана перспективная концепция проектирования тепловых схем паротурбинных установок (ПТУ) средней мощности с контактными теплообменниками смешивающего типа.

Например, для паротурбинной установки ПТ-40/50-8,8/1,3, производства ОАО «Калужский турбинный завод», предлагается переход от традиционной тепловой схемы с системой регенеративного подогрева, выполненного по схеме 2ПВД+Д+2ПНД к бездеаэрационной схеме 2ПВД+2СП (Рис.1).

Процесс деаэрации основного конденсата, в предлагаемой тепловой схеме, происходит поэтапно. На первом этапе деаэрация осуществляется в конденсаторе смешивающего типа (СК), после чего основной конденсат поступает в смешивающий подогреватель СП-1, а затем в смешивающий подогреватель СП-2.

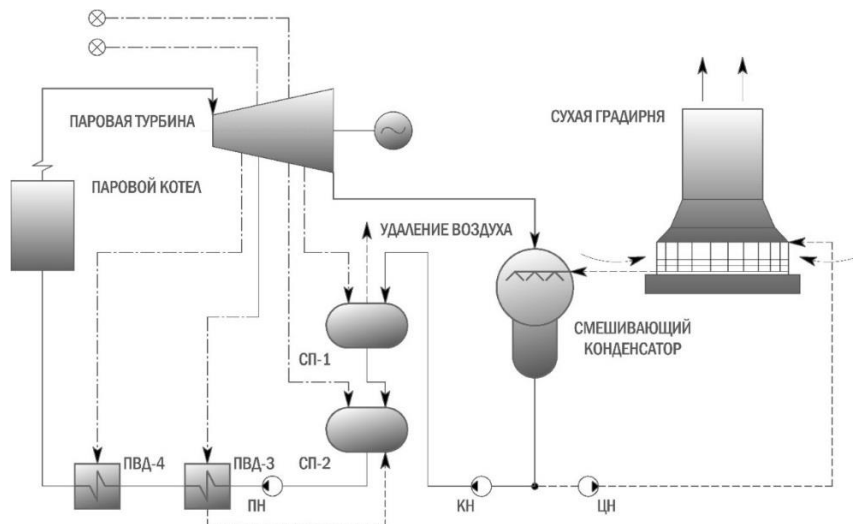


Рис. 1. Бездеаэрационная тепловая схема паротурбинной установки ПТ-40/50-8,8/1,3

Смешивающие подогреватели имеют наилучшие условия для процессов теплообмена между греемой средой – конденсатом, и греющей – паром низкого давления из отбора турбины, за счет их непосредственного контакта. В этом случае также исключено термическое сопротивление трубчатых теплообменных поверхностей.

В отечественной теплоэнергетике установлена величина нормированного недогрева в поверхностных подогревателях. Она составляет порядка 2...4 °С. На практике, данная величина может достигать 10 °С и более.

К достоинствам смешивающих подогревателей можно отнести:

- простоту конструкции, изготовления и обслуживания, а, следовательно, и снижение затрат на их производство;
- стабильный и максимально возможный нагрев конденсата при относительно высоком содержании неконденсирующихся газов;
- возможность деаэрирования конденсата.

Сегодня отсутствуют общепризнанные достоверные методики теплового и гидравлического расчета смешивающих подогревателей, необходимые при их проектировании. В КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана собственная методика теплового и гидравлического расчета СП на основе результатов исследований, приведенных в [4, 5, 6]. Конструктивное исполнение и схема включения разработанных смешивающих подогревателей выполнены по рекомендациям ОАО «НПО ЦКТИ». Конструктивно, подогреватели являются горизонтальными, струйными, с поперечным движением пара, а схема их включения – гравитационной с дополнительным насосом.

Одним из главных недостатков контактной системы регенеративного подогрева является возможность заброса конденсата в проточную часть паровой турбины при нештатной работе системы защиты и автоматики. Данная проблема подробно рассмотрена в [7, 2]. Возможность попадания влаги в проточную часть из системы регенерации обусловлена наличием обратного потока пара, возникающего при вскипании конденсата в СП, возможного при сбросе нагрузки паровой турбины [8].

Значительно упрощают задачу проектирования специализированные программные пакеты. Такое программное обеспечение основано на принципе визуального программирования, имеет простой и интуитивно понятный интерфейс, а также удобную форму представления результатов расчетов. Расчет теплового и материального балансов разработанной бездеаэрационной тепловой схемы производился с помощью специализированного программного обеспечения «United Cycle».

Было проведено математическое моделирование предлагаемой системы регенеративного подогрева со смешивающими подогревателями (Рис.2), а также выполнен тепловой расчет паровой турбины со штатными параметрами турбины ПТ-40/50-8,8/1,3. Для сравнения на Рис.3 представлены результаты расчета штатной системы регенерации.

В ходе проведения математического моделирования разработанной компоновки системы регенеративного подогрева, ее анализа и оптимизации с помощью специализированного программного обеспечения, было выявлено, что имеющиеся в штатной турбине отборы не соответствуют требованиям, предлагаемой бездеаэрационной тепловой схемы. В связи с этим, один из отборов пара из турбины был конструктивно перенесен за 10 ступень.

В рассмотренных вариантах выполнения системы регенерации мощность и конструкция турбины, общий расход пара на систему регенерации, расход пара в конденсатор практически одинаковы, при этом стоимость установки со смешивающими теплообменниками существенно ниже.

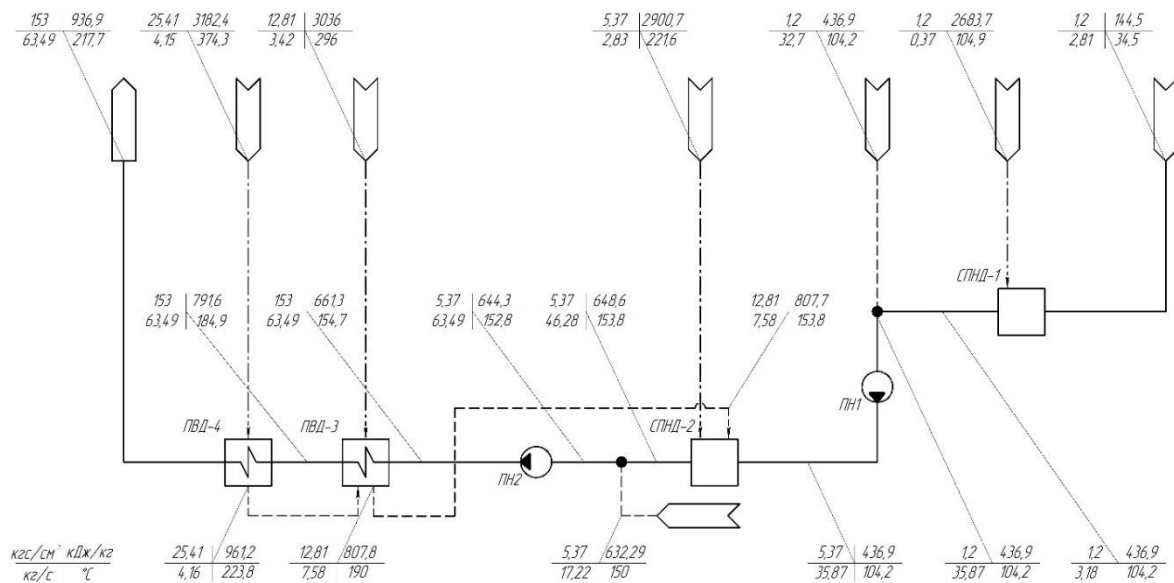


Рис. 2. Параметры рабочих сред разработанной системы регенеративного паротурбинной установки ПТ-40/50-8,8/1,3 в бездеаэрационном исполнении

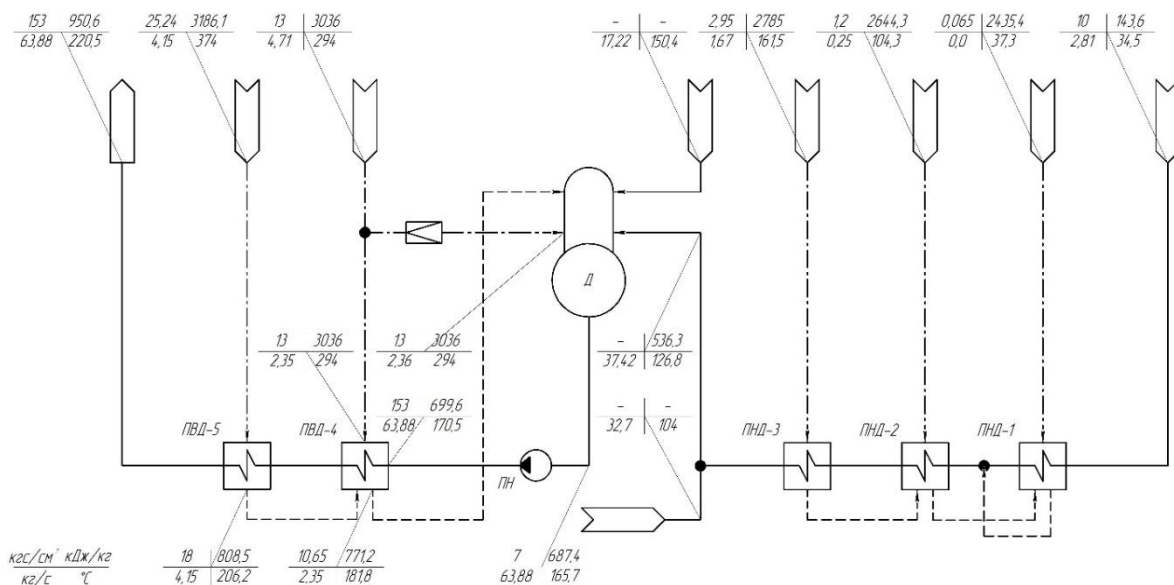


Рис. 3. Параметры рабочих сред штатной системы регенеративного подогрева паротурбинной установки ПТ-40/50-8,8/1,3

Широкое внедрение смесительных теплообменных аппаратов в паротурбинных установках сегодня сдерживается, в основном, недостаточной изученностью и сложностью процессов конденсации пара при контактном теплообмене и характеристиках рабочих тел современных ПТУ, отсутствием достоверных методик расчета и проектирования СК и СП. При этом следует учитывать сложности моделирования двухфазных и многокомпонентных рабочих тел, неравномерность их гидрогазодинамических и теплофизических параметров, неопределенность положения и состояния струй жидкости, вызванных воздействием внешних и внутренних сил [5].

В работе были выполнены следующие задачи:

- разработана методика и программа расчета теплообменных аппаратов смешивающего типа;
- предложена оптимальная компоновка системы регенерации для бездеаэрационного исполнения тепловой схемы ПТУ;
- построена математическая модель предлагаемой системы регенерации с применением специализированного программного обеспечения;
- выполнены вариантные тепловые расчеты паровой турбины ПТ-40/50-8,8/1,3 на нескольких режимах работы штатной и предлагаемой тепловой схемы;
- выполнены тепловые и гидравлические расчеты группы смешивающих подогревателей, смешивающего конденсатора, а также произведена их конструктивная проработка и схема включения в тепловую схему ПТУ.

Таким образом, переход на бездеаэрационную тепловую схему, применение смешивающих подогревателей в системе регенерации, а также применение конденсаторов смешивающего типа может существенно повысить эффективность энергоустановок при их реконструкции, модернизации или строительстве новых тепловых электростанций.

Список литературы

[1] Ефимочкин Г.И. Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

[2] Мороков В.Ф. Тепловой расчет систем контактной регенерации паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 136 с.

[3] Тарасов Е.В., Жинов А.А. Исследование эффективности бездеаэрационных схем ПТУ со смешивающими подогревателями // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, апрель 2016 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

[4] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Обобщение опытных данных по конденсации пара на струях воды в условиях вакуума // Теплоэнергетика, 1970, №10

[5] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Тепло- и массообмен при конденсации пара на струях воды // Теплоэнергетика, 1975, №11

[6] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Конденсация на струях воды при поперечном движении пара // Теплоэнергетика, 1976, №4

[7] Ермолов В.Ф., Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л. Смешивающие подогреватели паровых турбин. –М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.

[8] Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н. Методика расчета набухания уровня воды и защитных средств, исключаяющих ее попадание в проточную часть турбины с обратным потоком пара из смешивающих подогревателей. Теплоэнергетика, №2, 2008, с.72–77

Тарасов Евгений Витальевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. каф. "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Г.М. Калюжный, А.А. Жинов

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На сегодняшний день одной из важнейших проблем, стоящих перед энергетикой, является истощение топливно-энергетических ресурсов, таких как нефть, каменный уголь, природный газ. В связи с этим во всем мире ставится задача по увеличению эффективности энергоустановок и энергосбережению.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является утилизация тепла выхлопных газов различных двигателей, что не только позволяет экономить топливо, но и повышает эффективность энергетических установок, а значит уменьшает техногенные выбросы в окружающую среду. Наиболее перспективными в этом отношении являются газотурбинные установки (ГТУ), с выхлопом которых выбрасывается огромное количество горячих газов, тепло которых может быть полезно использовано.

В таблице 1 приведены основные характеристики выхлопа распространенных энергетических ГТУ средней мощности. Здесь: G_2 – расход выхлопных газов, T_2 – температура выхлопных газов, Q_2 – тепловая мощность выхлопа, КПД – коэффициент полезного действия двигателя.

Таблица 1. Основные характеристики выхлопа энергетических ГТУ средней мощности

№	Марка	Производитель	G_2 , кг/с	T_2 , К	Q_2 , МВт	КПД, %
1	НК-14БР	ОАО «Моторостроитель», ОАО «СКБМ»	39	870	10,5	33
2	GT 25000 (ДГ80)	ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект»	88,5	758	27,5	36
3	ГТЭР-16	ОАО «Невский завод», АО НИКТИТ	98	811	16	32,5
4	ГТУ-25ПЭР	ОАО «Пермский моторный завод»	80,2	744	25,3	38,6
5	ГТД-110	ОАО «НПО «Сатурн»	362	790	114,5	36
6	ГТЭ-70	ОАО «Турбоатом»	349,4	709	73	31,2
7	GT35	Alstom Power	92,3	648	17	32,1
8	GT8C2	Alstom Power	194,6	785	57,2	34,7
9	PG7121(EA)	GE Power Systems	292	809	85,4	-
10	FT8 Power Pac	MAN Turbomaschinen AG GHH Borsig	83	729	25,69	-
11	MF-221	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd	108	806	30	-
12	RB211	Rolls-Royce	94,5	491	28,7	37
13	Trent (WLE)	Rolls-Royce	166	423	58	40,7
14	401	Siemens	227	850	83,6	36

Из таблицы 1 видно, что на выходе из современных газотурбинных двигателей средней мощности высокие температуры газа и большая располагаемая тепловая мощность для утилизации тепла уходящих газов [1].

Рассмотрим основные способы утилизации тепла уходящих газов ГТУ.

Утилизация с помощью котла-утилизатора.

Котел-утилизатор - устройство, передающее теплоту отходящих газов газотурбинных установок или дизелей, сушильных барабанов, вращающихся и туннельных печей другому теплоносителю. Котлы утилизаторы позволяют получать горячую воду или пар, который используют в паротурбинных установках или для технологических нужд. Применение котла-утилизатора в парогазовой установке показано на рисунке 1.

К преимуществам паровых котлов-утилизаторов относится уменьшение отвода тепла от установки в окружающую среду и более эффективное использование топлива. В зависимости от типа, котлы-утилизаторы могут быть: паровые и водогрейные; оснащенные дожигающим устройством или без него; одного, двух или трех уровней давлений; вертикального и горизонтального профиля; подвесные и самоопорные.

Применение паровых котлов-утилизаторов в энергетике, промышленности, строительстве и сельском хозяйстве позволяет эффективно реализовывать энергосберегающие технологии. Крупные котлы-утилизаторы, как правило, не имеют всех элементов традиционного котлоагрегата. Отходящие из ГТД газы попадают сразу на поверхности нагрева: в экономайзер, испаритель, пароперегреватель. Воздухоподогреватель и топка в котлах-утилизаторах отсутствуют. Температура газов, поступающих в энергетический котел-утилизатор, составляет $350...600^{\circ}\text{C}$.

Широкое распространение котлы-утилизаторы нашли в современных энергетических парогазовых установках (ПГУ) [2].

Большое разнообразие конструкций котлов-утилизаторов объясняется различными местными условиями их применения. Например, на химических производствах есть установки, в которых энергетический агрегат работает при давлении охлаждаемых газов до $0,7\text{ МПа}$, давление же газов в $0,1...0,15\text{ МПа}$ встречается весьма часто.

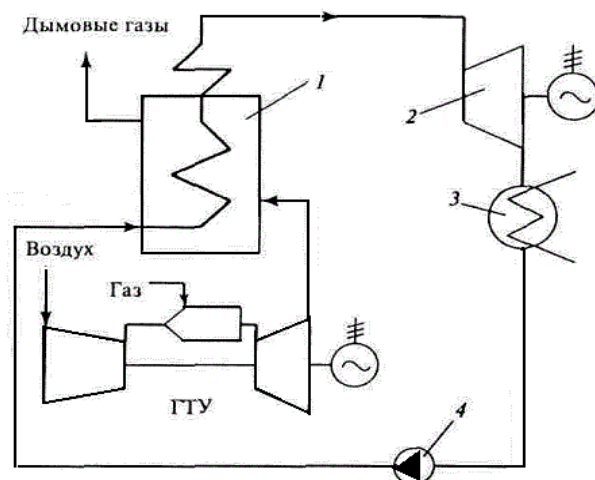


Рис. 1. Схема парогазовой установки с котлом-утилизатором
1-котел-утилизатор; 2-паровая турбина; 3-конденсатор; 4-питательный насос;

Таким образом, применение котлов-утилизаторов в системах утилизации теплоты позволяет более полно использовать энергию топлива в энергетических установках, что существенно повышает их эффективность [3].

Подогрев питательной воды в регенеративных подогревателях.

Регенеративным подогревом питательной воды паротурбинной установки называют подогрев направляемого в парогенератор конденсата и добавочной воды паром из отборов турбины или подогрев с помощью тепла уходящих газов ГТУ [4] в газовой турбине (ГВП) (Рисунок 2).

Регенеративный подогрев питательной воды в ГВП можно организовать и как отдельную ступень подогрева и как замещение паровой регенерации. ГВП может включаться последовательно или параллельно с паровыми регенераторами, что позволяет расширить регулировочный диапазон энергоустановки и обеспечить оптимальные условия работы теплообменников.

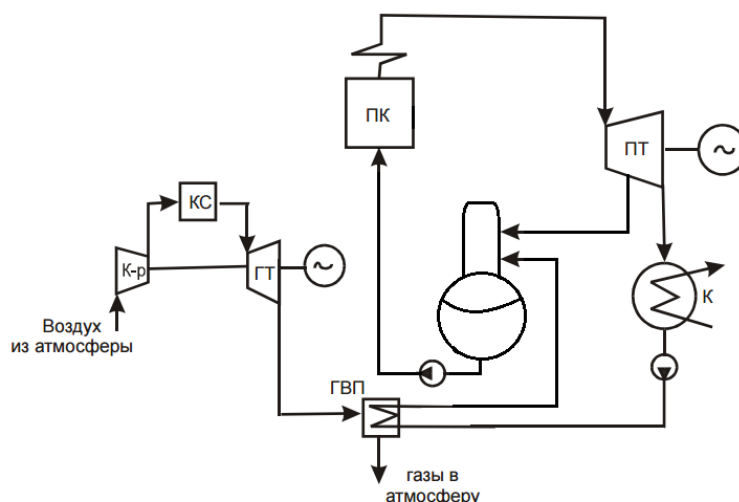


Рис. 2. Схема установки с использованием теплоты отработавших газов газовой турбины для подогрева питательной воды

К-р – компрессор; КС - камера сгорания; ГТ- газовая турбина; ПК- паровой котел; ПТ- паровая турбина; ГВП- газовой подогреватель

Подогрев сетевой или промышленной воды.

Подогрев сетевой или промышленной воды может осуществляться не только посредством отдельного котла-утилизатора или ГВП (Рисунок 3), но и с помощью небольших регенеративных теплообменников, встраиваемых в выхлопной тракт ГТУ, например, как описано в [5] (Рисунок 4).

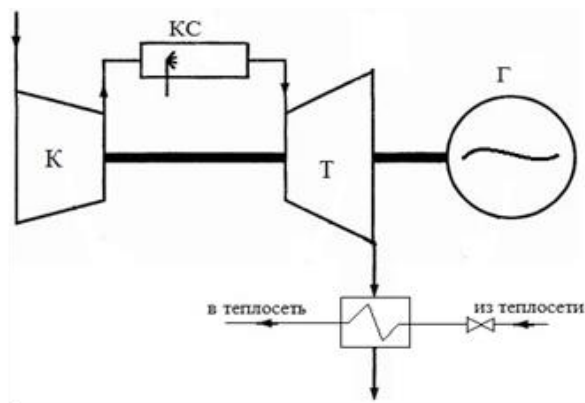


Рис. 3. Принципиальная схема установки с подогревом сетевой воды
 К-компрессор; КС- камера сгорания; Т-турбина; Г-генератор

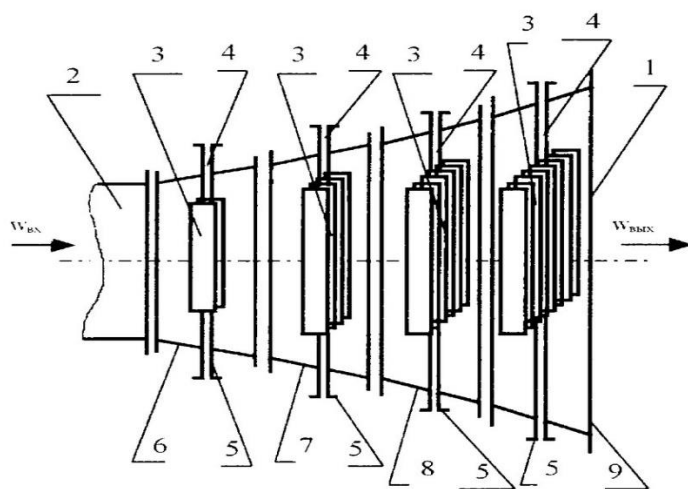


Рис. 4. Утилизационный теплообменный аппарат
 2-выход из ГТУ; 1-выход из теплообменного аппарата; 4,5- трубки; 3- теплопередающее устройство. 6,7,8 - корпус

Теплообменный аппарат размещен непосредственно на выходе из ГТД, его разбивают на определенное количество отдельных участков, в каждом из них размещают такое количество теплопередающих устройств, при котором исключалось бы загибание потока газов на этом участке, а размер поперечного сечения каждого участка постепенно увеличивают от начала участка до его конца, при этом за счет отвода максимального количества тепла от газов к рабочей жидкости и расширения сечения при заданном аэродинамическом сопротивлении каждого участка снижают скорость газов на выходе из теплообменного аппарата.

Утилизация тепла для выработки пара, который подается в камеру сгорания ГТУ.

В этом случае теплоутилизатор (ТУ) используется для получения и подачи горячей воды или пара в камеру сгорания ГТУ. Кроме утилизации тепла уходящих газов в таких контактных парогазовых установках удается существенно повысить мощность. Кроме того, для ГТУ ТЭЦ это также позволяет использовать теплоутилизатор в неотапительный сезон (Рисунок 5). Экономический эффект при такой схеме, по отношению к традиционной, имеет место из-за заме-

щения части компрессорного воздуха для газовой турбины паром, полученным в сепараторе за счет перегрева воды в утилизаторе турбины. Это позволяет:

- сократить расход энергии на компрессорный воздух;
- улучшить характеристики продуктов сгорания, как рабочего тела;
- повысить мощность и экономичность контактной ГТУ [6].

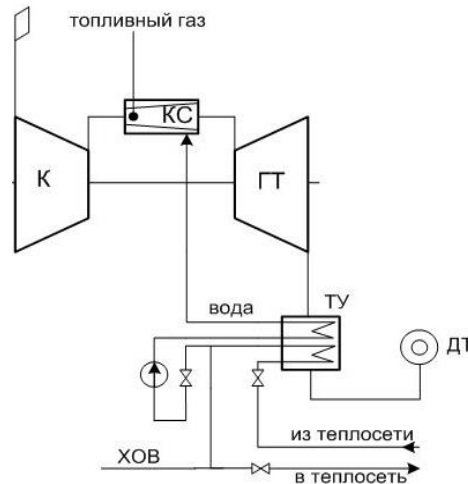


Рис. 5. Принципиальная схема контактной ГТУ

Утилизация выхлопных газов с применением низкокипящих рабочих тел.

Утилизацию тепла выхлопных газов ГТУ можно получить, используя ПГУ реализующую органический цикл Ренкина (ОРЦ). Рабочим телом в ОРЦ является вещество, имеющее более низкую, чем у воды, температуру кипения. Это позволяет эффективно утилизировать низкопотенциальную энергию. В ПГУ с ОРЦ выхлопные газы ГТУ сначала передают свое тепло термическому маслу в котле-утилизаторе. Термическое масло, в свою очередь, отдает тепло органическому теплоносителю (бутан, пентан, фреоны) в испарителе. Полученный пар низкокипящего теплоносителя направляется в турбину, а затем в конденсатор.

Реализация ОРЦ цикла позволяет повысить КПД установки на 8...10%. К недостаткам ПГУ с ОРЦ следует отнести неотработанность технологии и, как следствие, недостаточную надежность при эксплуатации [7].

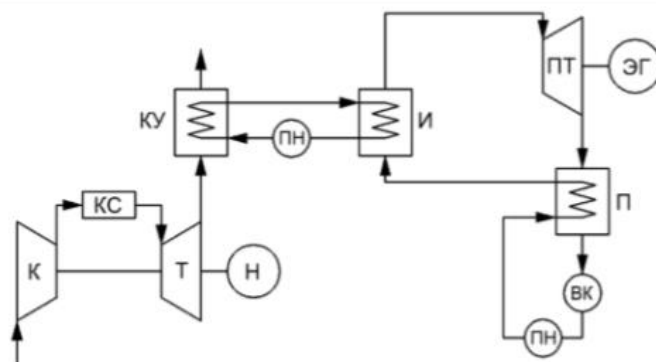


Рис. 6. Схема парогазовой установки с ОРЦ: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; Н – нагнетатель природного газа; КУ – котел утилизатор; ПТ – паровая турбина (работает на органическом теплоносителе); ВК – воздушный конденсатор; ПН – питательный насос; И – испаритель; П – подогреватель; ЭГ – электрогенератор

Таким образом, можно отметить, что выбор той или иной схемы утилизации тепла выхлопных газов конкретной ГТУ требует решения сложной технико-экономической задачи, учитывающей такие факторы как эффективность и надежность теплоутилизационной установки, стоимость разработки, изготовления и эксплуатации.

Список литературы

[1] Каталог газотурбинного оборудования, изд. «GAS TURBO TECHNOLOGY», Рыбинск, 2001 г.

[2] *Трухний А.Д.* Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов/ - М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 667 с.: ил.

[3] *Разуваев А. В., Кудашева И.О., Костин Д. А.* Системы утилизации теплоты энергоустановок как способ энергосбережения // Молодой ученый. – 2015 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/103/> (дата обращения 20.03.17)

[4] Предварительный подогрев питательной воды, общая характеристика [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.energsovet.ru/entech.php?idd=87> (дата обращения 20.03.17)

[5] *Щеглов Г.А.* Способ утилизации тепла отработанных газов газотурбинного двигателя, Патент РФ 2187674, 2002 г.

[6] *Гудзюк В.Л., Шомов Е.В.* Возможная схема использования утилизатора ГТУ, 2009 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivpromenergo.ru/page/columns.php?pdate=d20090204t152400> (дата обращения 20.03.17)

[7] *Жинов А.А., Карышев А.К., Шевелев Д.В.* ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2015. №4 (4). С. 28-37. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/def653534cf75d26cfa39efedd0c9a67.pdf> (дата обращения 20.03.17)

Калужный Григорий Матвеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kaluzhniygrisha@hotmail.com

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. каф. "Тепловые двигатели и теплофизика", КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

СЕКЦИЯ 5.

**КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ;
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВОМ**

Пью Чжо Кхаунг, Ю.И. Мышляев

АЛГОРИТМЫ СКОРОСТНОГО БИГРАДИЕНТА ДЛЯ ДВУХКАСКАДНЫХ СИСТЕМ С ЖЕЛАЕМОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе [1] предложен метод скоростного биградиента для двухкаскадных систем. В этой работе предложен алгоритм скоростного градиента, у которого состоит из двух этапов. На первом этапе синтезируется виртуальное управление конечным каскадом, обеспечивающее достижение заданной цели управления. На втором этапе неизвестные параметры «идеального» виртуального управления заменяются настраиваемыми, и синтезируется алгоритм адаптации. На третьем этапе формируется отклонение от пересечения гиперповерхностей и синтезируется управление, обеспечивающее достижение пересечения гиперповерхностей.

Постановка задачи

Рассмотрим линеаризованную модель беспилотного летательного аппарата с учетом динамики привода

$$\text{ОУ:} \quad \begin{cases} S_1 : \begin{cases} \dot{h} = a_{12}\theta \\ \dot{\theta} = a_{22}\theta + a_{23}\delta \end{cases} \\ S_2 : \begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = a_{43}\delta + a_{44}\omega + bu \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где S_1 – динамика летательного аппарата, S_2 – динамика рулевого привода, h – высота, θ – угол наклона траектории, δ – угол отклонения руля высоты, ω – скорость отклонения руля высоты, a_{ij}, b – параметры объекта управления (ОУ), u – входное воздействие.

Целью управления (ЦУ) является ограниченность траекторий замкнутой системы и достижение желаемого выхода $\varphi(t) = (f \quad f' \quad f'' \quad f''')^T$ при $t \rightarrow \infty$, где $f(t)$ – заданный ограниченный желаемый выход вместе со своими производными вплоть до 3-го порядка.

Этап 1. Выходной каскад имеет относительную степень $\rho = 2$. Для обеспечения относительной степени равной 1 введем информационный выход входного каскада в виде

$$y_u(s) = (\tau s + 1)y(s), \quad (2)$$

где $\tau > 0$. С целью повышения качества синтезируемой системы управления повысим астатизм подсистему S_1 .

При этом модель ОУ (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \bar{S}_1: \dot{\bar{\mathbf{z}}}_1 &= \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{z}}_1 + \bar{\mathbf{b}}y_u, \quad y = \mathbf{C}\bar{\mathbf{z}}_1 \\ \bar{S}_2: \begin{cases} y_u = \tau\omega + \delta, \\ \dot{\bar{\mathbf{z}}}_2 = \mathbf{A}_2\bar{\mathbf{z}}_2 + \mathbf{b}_2u, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{z}}_1^T = (z \quad h \quad \theta \quad \delta)$, $z \square \int_0^t h(\tau)d\tau$, $\bar{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 & -\tau^{-1} \end{pmatrix}$, $\bar{\mathbf{b}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau^{-1} \end{pmatrix}$,

$$\bar{\mathbf{z}}_2 = (\delta \quad \omega)^T, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = (1 \quad 0).$$

Приведем $\bar{S}_1(3)$ к форме Фробениуса

$$\tilde{S}_1: \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_1 = \mathbf{A}_1\tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1y_u, \quad (4)$$

где $\tilde{\mathbf{z}}_1 = \begin{pmatrix} \int_0^t h(\tau)d\tau & h(t) & \dot{h}(t) & \ddot{h}(t) \end{pmatrix}^T$, $\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ -\alpha_0 & \dots & -\alpha_3 \end{pmatrix}$, $\mathbf{b}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ b_1 \end{pmatrix}$

Этап 2. Синтез управления, которое обеспечивается достижение желаемой спектральной динамики.

Предположение. [2]. Введем функцию $f(t)$ вида

$$f(t) = \sum_{i=1}^l t^{m-1} e^{\lambda_i t} (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t) = \sum_{i=1}^l \left(c_i t^{m-1} e^{(\lambda_i + j\omega_i)t} + c_i^* t^{m-1} e^{(\lambda_i - j\omega_i)t} \right), \quad (5)$$

где a_i, b_i – константы, $c_i = c_{i0} + jc_{i1}$, $c_i^* = c_{i0} - jc_{i1}$, $a_i = 2c_{i0}$, $b_i = -2c_{i1}$, $\lambda_i \leq 0$, $j^2 = -1$.

Определение [2]. Назовем генерирующей моделью систему, которая имеет форму и размерность представления объекта (4), и генерирует сигнал вида (5) на выходе.

Рассмотрим $\lambda_i \pm j\omega_i$, $i = \overline{0, l}$ в качестве взаимно-простых корней некоторого характеристического уравнения. Характеристическое уравнение имеет вид

$$\prod_{i=1}^{k_1} (s - \lambda_i) \prod_{p=1}^{k_2} (s - \lambda_p + j\omega_p)(s - \lambda_p - j\omega_p) = s^k + \beta_{k-1}s^{k-1} + \dots + \beta_0 = 0, \quad (6)$$

где β_i – константы, которые определяются корнями характеристического уравнения, k_1 – количество вещественных корней, k_2 – количество пар комплексно-сопряженных порядок $k = k_1 + 2k_2$ ($l \leq k \leq 2l$).

Характеристическое уравнение (6) определяет линейное однородное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^k}{dt^k} y_{\vartheta}(t) + \beta_{k-1} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} y_{\vartheta}(t) + \dots + \beta_0 y_{\vartheta}(t) = 0, \quad (7)$$

тогда решение имеет вид

$$y_{\vartheta}(t) = \sum_{i=1}^k \left(C_i t^{m-1} e^{(\lambda_i + j\omega_i)t} + C_i^* t^{m-1} e^{(\lambda_i - j\omega_i)t} \right). \quad (8)$$

В соответствии с определением [2], в зависимости от степени характеристического многочлена (6), порожденного разложением (5), рассмотрим формирование генерирующей системы.

Если выберем $k = 4$, то в соответствии с уравнением (7) генерирующая модель имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m, \quad y_m = \mathbf{C} \mathbf{x}_m, \quad (9)$$

где $\mathbf{A}_m = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ -\mu_0 & \dots & -\mu_3 \end{pmatrix}$, $\mathbf{x}_m(0) = (y_{\vartheta}(0) \dots y_{\vartheta}(0)_i^{(3)})^T$ – вектор начальных условий. При этом $y_{\vartheta}(t) = f(t)$.

Введем модель ошибки между объектом (4) и генерирующей моделью (9)

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} &= \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1 y_u - \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m, \\ y_{\varepsilon} &= \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (10)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{z}}_1 - \mathbf{x}_m$ – вектор ошибки по состоянию.

Введем эталонную модель ошибки, которая стремится к нулю вида

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_* = \mathbf{A}_* \boldsymbol{\varepsilon}_*, \quad (11)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_* \in R^4$, $\mathbf{A}_* = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ -a_0^* & \dots & -a_3^* \end{pmatrix}$ – гурвицевая матрица с заданным расположением собственных чисел. Выберем начальные условия нулевыми ($\boldsymbol{\varepsilon}_*(0)$).

Описание системы (11) в форме Фробениуса позволяет использовать вместо него вектор $\boldsymbol{\varphi}$, сформированный по $f(t)$ и его производным и являющийся точным (аналитическим) решением ($\mathbf{x}_m(t) = \boldsymbol{\varphi}(t)$) системы (7). Тогда динамическая модель ошибки имеет вид

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1 y_u - \dot{\boldsymbol{\varphi}},$$

где $\mathbf{x}_m \square \boldsymbol{\varphi}$.

Поставим дополнительную цель управления вида

$$\|\mathbf{e}\| \leq \Delta_e, \quad \Delta_e > 0 \text{ при } t \geq t_*. \quad (12)$$

где $\mathbf{e} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_*$ – невязка.

Выберем функционал для модели невязки (10) с эталонной моделью (12) в виде

$$Q(\mathbf{e}) = 0,5 \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e}, \quad (13)$$

где $\mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0$.

Составим динамическую модель невязки

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1 y_u - \dot{\boldsymbol{\phi}} - \mathbf{A}_* \boldsymbol{\varepsilon}_* \pm \mathbf{A}_* \mathbf{e} = \\ &= \mathbf{A}_* \mathbf{e} + (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_*) \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1 y_u - \dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{A}_* \boldsymbol{\phi} = \\ &= \mathbf{A}_* \mathbf{e} + (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_*) \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_1 y_u + (\mathbf{A}_m - \mathbf{A}_*) \boldsymbol{\phi}.\end{aligned}\quad (14)$$

Выберем виртуальное управление из условия

$$\mathbf{b}_1 y_u^{virt} = (\mathbf{A}_* - \mathbf{A}_1) \tilde{\mathbf{z}}_1 + (\mathbf{A}_m - \mathbf{A}_*) \boldsymbol{\phi}.\quad (15)$$

Существование решения уравнения (15) относительно y_u^{virt} гарантируется управляемостью объекта (6), согласованностью структур матриц \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_* , \mathbf{A}_m и матриц \mathbf{b}_1 , \mathbf{b}_m соответственно. Алгоритм управления имеет вид

$$y_u^{virt} = \tilde{\mathbf{k}}_z \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{k}_m \boldsymbol{\phi},\quad (16)$$

где матрицы и коэффициент алгоритма управления выбираются из условий $\mathbf{b}_1 \tilde{\mathbf{k}}_z = \mathbf{A}_* - \mathbf{A}_1$, $\mathbf{b}_1 \mathbf{k}_m = \mathbf{A}_m - \mathbf{A}_*$.

Подставляя (16) в (14) получаем $\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_* \mathbf{e}$ и, в силу гурвицевости матрицы \mathbf{A}_* , цель управления (12) достигается. Из $\mathbf{e} \rightarrow 0$ следует, что $\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_* \rightarrow 0$ и, в силу гурвицевости эталонной модели (11), $\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{z}}_1 - \boldsymbol{\phi} \rightarrow 0 \Leftrightarrow \tilde{\mathbf{z}}_1 \rightarrow \boldsymbol{\phi}$. Таким образом, исходная цель управления достигается. Ограниченность траекторий при любых ограниченных начальных условиях $\tilde{\mathbf{z}}_1(0)$ вытекает из ограниченности $\mathbf{x}_m(t)$, что, в свою очередь, гарантируется ограниченностью правой части разложения (5) и ограниченностью ее производных по времени.

В замкнутой системе (4), (16) достигается цель управления $\tilde{\mathbf{z}}_1 \rightarrow \boldsymbol{\phi}$ при $t \rightarrow \infty$, траектории системы ограничены при любых ограниченных начальных условиях и справедлива оценка $\boldsymbol{\varepsilon}(t)^T \mathbf{H} \boldsymbol{\varepsilon}(t) \leq \boldsymbol{\varepsilon}(0)^T \mathbf{H} \boldsymbol{\varepsilon}(0) \cdot e^{-\rho t}$, где $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \tilde{\mathbf{z}}_1(t) - \boldsymbol{\phi}(t)$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0$: $\mathbf{H} \mathbf{A}_* + \mathbf{A}_*^T \mathbf{H} = \mathbf{G}$, $\mathbf{G} = \mathbf{G}^T > 0$,

$\rho = \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{G})}{\lambda_{\max}(\mathbf{H})} > 0$; $\lambda_{\min}(\mathbf{G})$, $\lambda_{\max}(\mathbf{H})$ - минимальное и максимальное собственное число матрицы.

Этап 3. Сформируем отклонение информационного выхода от виртуального управления выходным каскадом $y_u^{virt} \in R^1$ и отклонение от пересечений многообразий гиперповерхностей $\sigma \equiv 0$ в виде

$$\sigma = y_u - y_u^{virt}\quad (17)$$

где $\sigma \in \square^m$ - вектор отклонения от пересечения многообразий $\sigma \equiv 0$.

Введем дополнительную цель управления

$$R(\sigma) = 0,5\sigma^2 \leq \Delta_\sigma \text{ при } t \geq t^*, \quad (18)$$

где $0 < \Delta_\sigma < \Delta_\varepsilon$, $t^* < t_*$.

Вычислим скорость изменения целевой функции

$$\begin{aligned} \dot{R}(\sigma) &= \sigma \dot{\sigma} = \sigma (\dot{y}_u - \dot{y}_u^{\text{virt}}) = \left(\tau(a_{43}\bar{z}_{21} + a_{44}\bar{z}_{22} + bu) + \dot{\bar{z}}_{21} - (\tilde{\mathbf{k}}_z \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{k}_m \phi)' \right) \\ &= \sigma \left(\tau a_{43} \dot{z}_{21} + (\tau a_{44} + 1) z_{22} + \tau bu - \tilde{\mathbf{k}}_z \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_1 - \mathbf{k}_m \dot{\phi} \right). \end{aligned}$$

Условие D1 (*условие достижимости*). Существует $u_* \in \square^1$, скалярная, строго возрастающая функция $\rho_R(R) > 0$ такая, что $\rho_R(R) = 0$ и выполняется неравенство $\mu(\sigma, u_*) \leq -\rho_R(R(\sigma))$, где $\mu(\sigma, u_*) = \sigma \dot{\sigma}$ в силу траекторий системы (4), (9-11), (14), (16).

Используя прямой подход к синтезу, выберем в качестве настраиваемых параметров регулятора $\Theta(t) = \text{col}\{\mathbf{k}_z(t)\}$. При этом управление основного контура имеет вид

$$y_u = \mathbf{k}_z \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{k}_m \phi. \quad (19)$$

Перейдем к синтезу алгоритма адаптации в классе алгоритма скоростного градиента (АСГ). Скоростной градиент имеет вид

$$\nabla_{\tilde{\mathbf{k}}_z} \dot{Q} = \mathbf{b}_1^T \mathbf{H} \mathbf{e} \tilde{\mathbf{z}}_1^T.$$

Выбирая АСГ в дифференциальной форме

$$\frac{d\mathbf{k}_z}{dt} = -\gamma \mathbf{b}_1^T \mathbf{H} \mathbf{e} \tilde{\mathbf{z}}_1^T, \quad \gamma > 0. \quad (20)$$

На основе скользящего режима закон управления, обеспечивающий достижение ДЦУ (20), синтезируется в дифференциальной форме АСГ [3] в виде

$$\begin{aligned} u &= -\gamma \cdot \text{sign}(|\sigma|) \\ u &= -\gamma \cdot (|\sigma|). \end{aligned} \quad (21)$$

Для замкнутой системы существует функция Ляпунова вида

$$V(\mathbf{e}, \sigma) = Q(\mathbf{e}) + R(\sigma).$$

В работе представлена методика синтеза и алгоритмы адаптивного управления с желаемой спектральной динамикой конечного каскада. Алгоритмы обеспечивают ограниченность траекторий замкнутой системы и заданную точность воспроизведения желаемого выхода и его производных вплоть до порядка на единицу меньше размерности вектора фазовых переменных выходного каскада. Алгоритм обеспечивает сходимость вектора состояния замкнутой системы к вектору, состоящему из желаемого выхода и его производных.

Список литературы

[1] *Мышляев Ю.И.* Метод бискоростного градиента. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5: в 3 ч. Ч.1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 168–178 с.

[2] *Мышляев Ю.И.* Об одном подходе к решению задачи слежения с желаемой спектральной динамикой // Труды ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина». Системы и приборы управления. 2016. № 4. 5–11 с.

Пью Чжо Кхаунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: blueheavenn1985@gmail.com

Мышляев Ю.И. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru

Я.А. Долгов, А.А. Зюзин, М.О. Корлякова

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ФАЛЬШИВЫХ ФОТОГРАФИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Обнаружение фальшивых фотографий имеет возрастающее практическое значение в современном мире. Такие фотографии часто используются в СМИ, которые распространяя их, непреднамеренно вводят в заблуждение читателей.

Идеи о том, что фотографии можно подделать, появились также давно, сколько и существует сама фотография. Во времена фотолабораторий фотографии поджигали, складывали, обрезали и даже соединяли вместе, чтобы создать желаемый образ [1]. Сегодня фотографии представлены в цифровой форме и легко подделываются с помощью компьютерных программ, таких как Adobe Photoshop [2]. Например, в 2015 Бюро Информации для прессы правительства Индии выпустило фотографию индийского премьер-министра Нарендра Моди, рассматривающего из самолета ущерб от наводнения в городе Ченнаи [3]. Изображение затопленного города было нанесено в иллюминаторе самолета Моди. Подделка получила много насмешек в прессе и СМИ.



Рис. 1. Нурендра Моди оценивает ущерб от наводнения

Таким образом, задача анализа фото и видеоматериалов является очень актуальной, а поскольку она имеет большую «ручную» составляющую, то имеет смысл рассмотреть методы автоматизации хотя бы некоторых этапов процедуры исследования изображений. Рассмотрим особенности формирования фотоизображений и подходы к обнаружению их фальсификаций.

Геометрия преобразования светового потока, который проецируется на экранную плоскость камеры, приводит к построению центральной проекции объектов сцены. Для таких изображений характерно появление точек схода. В графике точкой схода называется точка на плоскости изображения, где пересекаются проекции семейства параллельных линий в про-

странстве [4]. Например, фотография железнодорожных путей, удаляющихся от вас, в которых разрыв между дорожками, кажется, сокращается. В реальной трехмерной сцене разрыв между дорожками, конечно же, фиксирован, но, судя по основным свойствам перспективной проекции, он уменьшается, когда размер объекта, помещенного на сенсор камеры (или вашего глаза) обратно пропорционален расстоянию от камеры. Если железнодорожные пути имели бесконечную длину, они сходились бы в изображение единственной точки - точки схода (Рис. 2.). Традиционные линейные чертежи используют объекты с одним-трем набором параллелей, определяя от одной до трех точек схода.

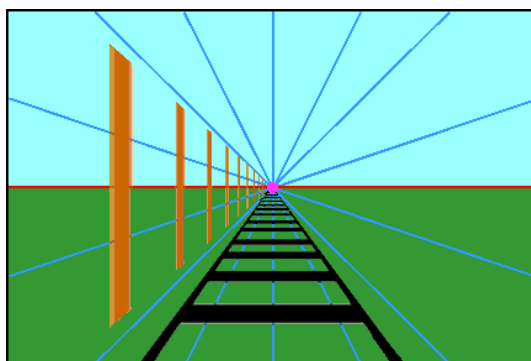


Рис. 2. Точка схода на фото ЖД путей

Влияние дисторсии на точки схода. Угол зрения более 90 градусов не позволяет отобразить объекты на плоском пространстве без искажений, потому что таким образом мы пытаемся показать то, что находится позади нас. Существуют методики создания фото с большим углом зрения. Результат можно проиллюстрировать на фотографии, сделанной с помощью линзы «рыбий глаз». Если в трехмерном пространстве линии прямые, то на получившемся фото они будут искривлены. Пучок прямых может исходить из точки в левой части рисунка, затем расходиться и вновь сходиться в точку в правой части.

Рассмотрим влияние сверхширокоугольных объективов с неисправленной дисторсией на примере объектива «рыбий глаз». Для анализа используем фотографии обычного объектива и объектива «рыбий глаз».

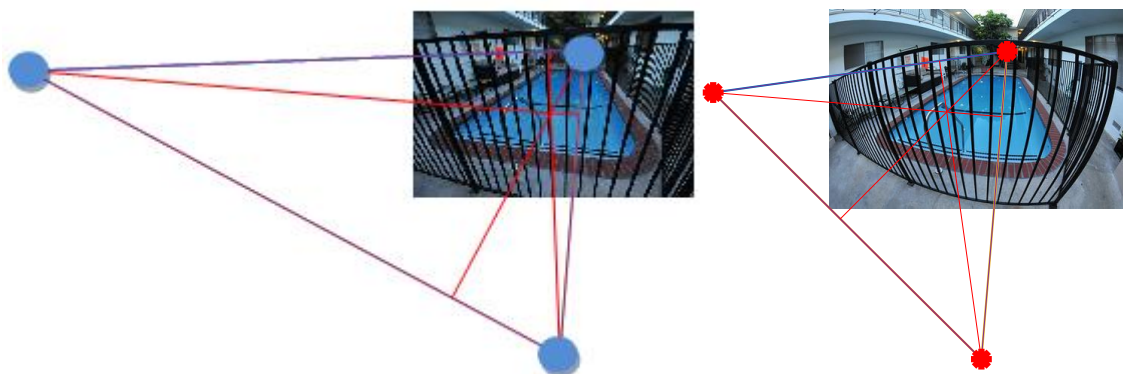


Рис. 3. Точки схода исходного изображения и изображения в объективе «рыбий глаз» соответственно

В результате вычисления точек схода двух изображений можно сделать вывод о том, что линзы «рыбий глаз» позволяют увидеть более широкую картинку, но с искаженным отображением прямых линий в виде дугообразных кривых.

Первый подход к обнаружению фальсификаций ориентирован на определение точек схода и анализу их позиции, которые в двумерном изображении зависят от ориентации параллельных линий в трехмерной сцене [5]. На рисунке выше показаны три различные точки схода (показаны голубым цветом), рассчитанные по горизонтальной и вертикальной линиям забора и бассейна. Три точки схода образуют треугольник. Для каждой из трех сторон треугольника, есть высота, которая проходит перпендикулярно к этой стороне до противоположной вершины треугольника. Три высоты треугольника пересекаются в точке, называемой ортоцентром. Ортоцентр - главная точка камеры [6]. Изображение имеет только одну главную точку, обычно в центре изображения или рядом с ним. В приведенном выше примере главная точка находится рядом с центром изображения, как и ожидалось в подлинном изображении. Если главная точка значительно отличается от центра изображения, у нас есть причина подвергнуть сомнению подлинность фотографии (при условии, конечно, что изображение не было обрезано). Таким образом, можно построить оценку достоверности кадра в форме расстояния главной точки от центра кадра (1).

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^2} > \Delta. \quad (1)$$

Следующий метод основан на исследовании точки схода тени [7]. Положение тени предоставляет информацию о положении света в сцене. Необходимо, чтобы параметры освещения были физически правдоподобными и согласованными во всей сцене. Таким образом, тень объекта может использоваться для обоснования расположения источника света.

Если последовательно соединить несколько точек объекта и соответственно его тени, на пересечении полученных прямых мы можем получить расположение источника света или точек схода тени. Все лучи, независимо от геометрии сцены, будут пересекаться в одной и той же точке. Рассмотрим пример, в котором точки схода теней будут различны и предложим решение данной проблемы.

Один из самых просматриваемых видеороликов YouTube 2012 года начинается с показа орла, парящего в небе. Орел делает медленный поворот, а затем быстро опускается к маленькому ребенку, сидящему на газоне. Родитель ребенка находится поблизости, но смотрит в другую сторону. Орел выхватывает ребенка. Когда орел начинает подниматься, он отпускает ребенка и тот падает с небольшой высоты. Это видео под названием «Golden Eagle Snatches Kid» [8] быстро собрало десятки миллионов просмотров. Хотя это была хорошо выполненная подделка, анализ тени, пока-

занный на следующем рисунке, показывает, что тени ребенка и орла не соответствуют остальной части сцены (рис. 4.). Действительно, это видео подделано на компьютере, а ребенок и орел, добавлены из другого видео.

Алгоритм анализа теней основан на следующей последовательности действий:

- ручная разметка, где вводятся пары точек объект-тень,
- определение параметров проекционной прямой, соединяющей эти точки (рис. 4),
- вычислении точек схода теней для каждой пары прямых (рис.4),
- оценка построенных точек схода с точки зрения близости.

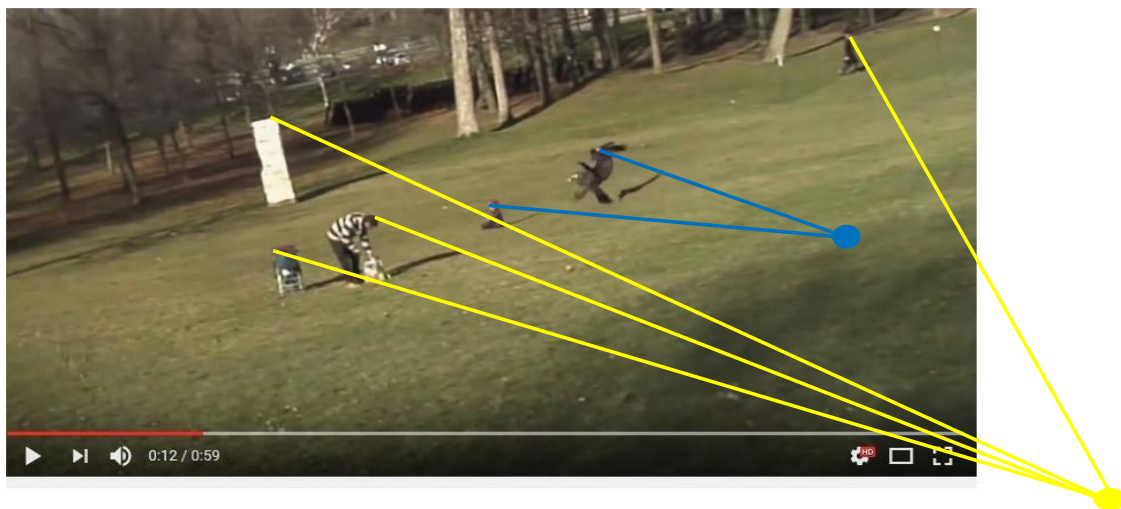


Рис. 4. Несоответствие теней сцены

Зная, как найти фальсифицированные кадры, можно предложить методику, которая позволит правильно расположить тени объектов таким образом, чтобы они проходили проверку и прямые проведенные через тень и объект сходились в той же точке, что и другие объекты.

Для этого нам необходимо будет знать, какие объекты сцены находятся на оригинальном изображении. В нашем случае это рекламный щит, два человека и коляска. Нам необходимо предположить каким образом должны быть расположены тени орла и ребенка, чтобы фото выглядело достоверно. Для этого проведем прямые, которые будут соединять объект и точку схода теней других объектов сцены (красные линии). Затем проведем прямую, которая будет показывать направление неправильных теней (зеленые линии) (рис.5). Пересечение этих двух линий будет искомой точкой, соединив которую с началом тени будет получена тень, удовлетворяющая условиям подлинности по точкам схода теней.



Рис. 5. Пересечение линий в точке, определяющей высоту тени

Существуют и другие методы, которые включают анализ зеркальных бликов, искажение линз, блики объектива, артефакты интерполяции массивов цветных фильтров, шумы датчиков, артефакты при сжатии форматов цифровой обработки изображений, таких как JPEG, и многое другое [9]. Однако даже двух представленных моделей достаточно для принятия решения о том, являются ли изображения, на которые мы смотрим, подлинными или поддельными.

Была собрана тестовая выборка из фото, включающих подделки, и произведено их распознавание.

Таблица 1. Оценка ошибки поиска подделок в тестовой выборке

Эксперимент №	1	2	3	4	5	6	7
Порог Δ , %	Максимальное расстояние между двумя точками 5% области изображения						
Расстояние D, %	1.551	0.913	0.233	9.081	6.476	0.354	0.006
Фото подделка	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Вывод алгоритма: фото подделка?	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Нет	Нет

Проведенные эксперименты позволили выделить практически все фальсифицированные кадры.

Список литературы

[1] Ализар А. Искусство подделки фотографий до цифровой эпохи. – Электронный ресурс. Метод доступа: <https://habrahabr.ru/post/154721/> (дата обращения 31.03.2017).

[2] Ross Aitken. How to Create an Abstract Photo Manipulation. – Электронный ресурс. Метод доступа: <https://www.photoshoptutorials.ws/photoshoptutorials/photo-manipulation/how-to-create-an-abstract-photo-manipulation/> (дата обращения 31.03.2017).

[3] Tanvi Madan. Пост в твиттере. – Электронный ресурс. Метод доступа: twitter.com/tanvi_madan/status/672415573427535873(дата обращения 31.03.2017).

[4] Nyosan. Перспектива. Все о перспективе. – Электронный ресурс. Метод доступа: <http://risovatlegko.ru/risovanie/chto-takoe-tochka-skhoda>(дата обращения 31.03.2017).

[5] Vvdom. Империя лжи. Перспективы. – Электронный ресурс. Метод доступа: <http://www.clumba.su/imperiya-lzhi-perspektivy/> (дата обращения 31.03.2017).

[6] Hany Farid. Photo forensics. – Cambridge, MA: The MIT Press, 2016.

[7] Kee, E., J. O'Brien, and H. Farid. Exposing photo manipulation with inconsistent shadows. – ACM Transactions on Graphics 32(4), 2013:28:1–12

[8] MrNuclearCat. Golden Eagle Snatches Kid. – Электронный ресурс. Метод доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=CE0Q904gtMI> (дата обращения 31.03.2017).

[9] Forensics and Security, Volume 7541. San Jose, CA. January 27. DOI: 10.1117/12.837788

Долгов Ярослав Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yaroslaw2710@mail.ru

Зюзин Александр Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wendid@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Тхан Хтайк Аунг, Чжо Свар Хейн, А.М. Макаренков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА СО СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современных системах автоматического управления широко применяются электрогидравлический следящий привод (ЭГСП).

Линеаризованная математическая модель ЭГСП описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = k_{yc} (u_{ex}(t) - k_{oc} y) \\ L \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) = u(t) \\ J_{я} \frac{d^2 \varphi_{я}(t)}{dt^2} + h_{я} \frac{d\varphi_{я}(t)}{dt} + (k_{M\varphi} + k_{cm}) \varphi_{я}(t) = k_{Mi} i(t) - k_{moc} x \\ k_{Q_y p_y} p_y(t) = k_{Q_y \varphi} \varphi_{я}(t) - F_3 \frac{dx(t)}{dt} \\ m_3 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + h_3 \frac{dx(t)}{dt} + 2C_{30} x(t) = F_3 p_y(t) \\ \frac{V}{2E} \frac{dp(t)}{dt} + k_{QP} p(t) = k_{QX} x - F \frac{dy}{dt} \\ M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + h \frac{dy(t)}{dt} + Cy(t) = Fp(t) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где, $u(t)$ – электрическое напряжение на входе ЭГСП (входной сигнал); $u_{ex}(t)$ – напряжение на обмотке управления электромеханического преобразователя (ЭМП); $i(t)$ – ток в обмотке управления ЭМП; $\varphi_{я}(t)$ – угол поворота якоря ЭМП и закрепленной на нем заслонки; $p_y(t)$ – перепад давления на торцах золотника электрогидравлического усилителя (ЭГУ); $x(t)$ – перемещение золотника ЭГУ (выходной сигнал ЭГУ); $y(t)$ – перемещение штока поршня гидроцилиндра (выходной сигнал ЭГСП)

Коэффициенты в уравнениях модели имеют следующий физический смысл: k_{oc} – коэффициент электрической обратной связи; k_{yc} – коэффициент передачи электронного усилителя; L – индуктивность обмотки управления ЭМП; R_a – активное сопротивление обмотки управления ЭМП; $J_{я}$ – момент инерции якоря ЭМП и заслонки относительно оси вра-

щения якоря; $h_{\text{я}}$ – коэффициент вязкого трения на якоре ЭМП; $k_{M\phi}$ и k_{Mi} – коэффициенты внешней моментной характеристики ЭМП; k_{Mp_y} – коэффициент, учитывающий влияние гидродинамических сил; k_{moc} – коэффициент механической обратной связи через гибкий стержень, соединяющий заслонку и золотник; V_y – объем управляющих полостей ЭГУ; E – модуль объемной упругости рабочей жидкости; $k_{Q_y P_y}$ и $k_{Q_y \phi}$ – коэффициенты линеаризации расходно-перепадной и регулировочной характеристик управляющего элемента «сопло-заслонка»; F_3 – площадь торца золотника ЭГУ; m_3 – масса золотника ЭГУ; h_3 – коэффициент вязкого трения на золотнике ЭГУ; $C_{ГД}$ – коэффициент жесткости гидродинамической пружины; k_{yc} – коэффициент передачи электронного усилителя сигнала ошибки; k_{oc} – коэффициент передачи цепи электрической обратной связи.

Система уравнений (1) описывает исходную модель ЭГСП, которой соответствует стандартная модель “вход-выход” линейного дифференциального уравнения n -го порядка

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \left(d^i / dt^i \right) X = \sum_{j=0}^m b_j \left(d^j / dt^j \right) Y; \quad a_n \equiv 1, \quad (2)$$

где Y – входной сигнал (электрическое напряжение), X – выходной сигнал (перемещение штока поршня). Все или некоторые коэффициенты a_i , b_j уравнения (2) зависят от случайных физических параметров ЭГСП и, таким образом, сами являются случайными величинами, определяемыми как

$$a_i = m_{a_i} + \tilde{a}_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad b_j = m_{b_j} + \tilde{b}_j, \quad j = \overline{0, m},$$

где m_{a_i} , m_{b_j} – математические ожидания; \tilde{a}_i , \tilde{b}_j – центрированные гауссовы случайные величины. Считается также, что система физически реализуема, то есть $n \geq m$, и начальные условия нулевые.

Для решения поставленной задачи целесообразно перейти от непрерывной модели (2) к усредненной проекционной модели [2]. В результате проекционной аппроксимации непрерывной модели (1), выполняемой с использованием методов теории матричных операторов [1], имеем следующую проекционную модель:

$$\mathbf{C}^X = \mathbf{A} \mathbf{C}^Y, \quad (3)$$

где \mathbf{C}^Y и \mathbf{C}^X – вектор-столбцы проекционных характеристик входного сигнала системы и ее выходного сигнала; \mathbf{A} – матричный оператор системы, определяемый как

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} + \mathbf{A}_X)^{-1} \mathbf{A}_Y. \quad (4)$$

Матрицы \mathbf{A}_X и \mathbf{A}_Y определяются следующим образом:

$$\mathbf{A}_X = \sum_{i=0}^{n-1} a_i (\mathbf{P}^{n-i})^T; \mathbf{A}_Y = \sum_{j=0}^m b_j (\mathbf{P}^{n-j})^T.$$

где \mathbf{P} - матричный оператор интегрирования по базису функции Уолша [1].

Запишем выражения для проекционных характеристик математического ожидания и автокорреляционной функции выходного сигнала системы.

Выражение для проекционной характеристики математического ожидания имеет следующий вид [2]:

$$\mathbf{C}^{m_x} = M[\mathbf{A}] \cdot \mathbf{C}^{m_y}. \quad (5)$$

При усреднении стохастического матричного оператора \mathbf{A} используется прием его приближенного представления матричным рядом

$$M[\mathbf{A}] = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_X)^{-1} \bar{\mathbf{A}}_Y + M[\Delta\mathbf{A}], \quad (6)$$

где

$$\Delta\mathbf{A} = \mathbf{A}_{X0} \left(\sum_{v=1}^{\infty} (-1)^v (\mathbf{A}_X^\Delta \mathbf{A}_{X0})^v \bar{\mathbf{A}}_Y + \sum_{v=0}^{\infty} (-1)^v (\mathbf{A}_X^\Delta \mathbf{A}_{X0})^v \mathbf{A}_Y^\Delta \right);$$

$$\mathbf{A}_{X0} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_X)^{-1}; \bar{\mathbf{A}}_X = \sum_{i=0}^{n-1} m_{a_i} (\mathbf{P}^{n-i})^T; \bar{\mathbf{A}}_Y = \sum_{j=0}^m m_{b_j} (\mathbf{P}^{n-j})^T;$$

$$\mathbf{A}_Y^\Delta = \sum_{i=0}^{n-1} a_i^{cl} (\mathbf{P}^{n-i})^T; \mathbf{A}_X^\Delta = \sum_{j=0}^m b_j^{cl} (\mathbf{P}^{n-j})^T.$$

Проекционная характеристика автокорреляционной функции выходного сигнала определяется выражением

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = \mathbf{C}^{R_{xx}} + \mathbf{C}^{m_x} (\mathbf{C}^{m_x})^T, \quad (7)$$

где проекционная характеристика второго начального момента определяется как

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = \left[\mathbf{C}^x (\mathbf{C}^x)^T \right] = M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^y (\mathbf{A} \mathbf{C}^y)^T \right] = M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^y (\mathbf{C}^y)^T \mathbf{A}^T \right]. \quad (8)$$

Вычисление (6) сводится к усреднению случайных величин, то есть к вычислению моментов вида

$$M \left[a_i^k \right], M \left[b_j \right], M \left[b_j^2 \right]; \quad k = \overline{1, v}; \quad i = \overline{0, n-1}; \quad j = \overline{0, m}. \quad (9)$$

Указанные стохастические моменты могут быть выражены через моменты первого и второго порядков с использованием соотношения

$\sum_{r=0}^{\infty} \alpha_r \frac{\lambda^r}{r!} = \prod_{r=1}^{\infty} \exp \left\{ \frac{\chi_r \lambda^r}{r!} \right\}$ [2]. Тот факт, что все случайные составляющие \tilde{a}_i , \tilde{b}_j имеют нулевые математические ожидания упрощает расчет.

Проекционные характеристики математического ожидания и автокорреляционной функции выходного сигнала, определяемые формулами (5), (7), позволяют в итоге определить эти статистические характеристики во

временной области для заданного конечного числа членов разложения по ортогональному базису:

$$m_X^l(t) = \Phi_{(l)}^T(t) C_{(l)}^{m_X}; \quad (10)$$

$$R_{XX}^l(t_1, t_2) = \Phi_{(l)}^T(t_1) C_{(l \times l)}^{R_{XX}} \Phi_{(l)}(t_2). \quad (11)$$

Пример. В качестве случайного параметра примем коэффициент вязкого трения на золотнике ЭГУ h_3 ($m_{h_3} = 0,25 \frac{H \cdot c}{M}$, $D_{h_3} = 0,003 \frac{H^2 c^2}{M^2}$). На вход системы поступает сигнал $y(t) = 0.01H(t)$, [В]. На рис.1 представлен график математического ожидания выходного сигнала стохастической модели ЭГСП (кривая 1) в сравнении с графиками выходного сигнала детерминированной модели ЭГСП при максимальном значении параметра h_3 ($h_3 = m_{h_3} + 3 \cdot \sqrt{D_{h_3}}$, кривая 2), номинальном ($h_3 = m_{h_3}$, кривая 4) и минимальном ($h_3 = m_{h_3} - 3 \cdot \sqrt{D_{h_3}}$, кривая 3) значении данного параметра. На рис. 2 представлены графики первых 20-ти реализаций случайного процесса на выходе стохастической модели ЭГСП, график математического ожидания (кривая 1) и среднеквадратического отклонения (кривая 2) данного случайного процесса.

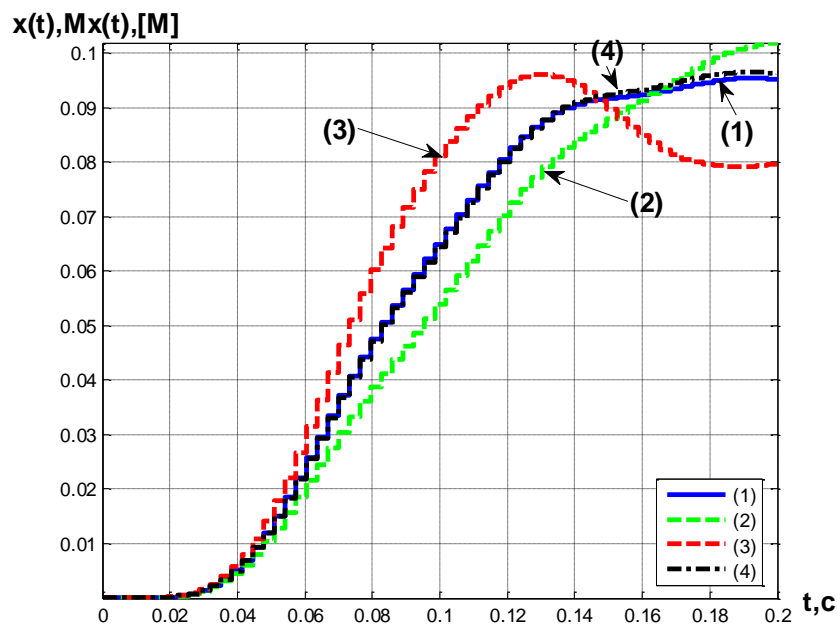


Рис. 1. Выходной сигнал ЭГСП (переходный процесс и его математическое ожидание)

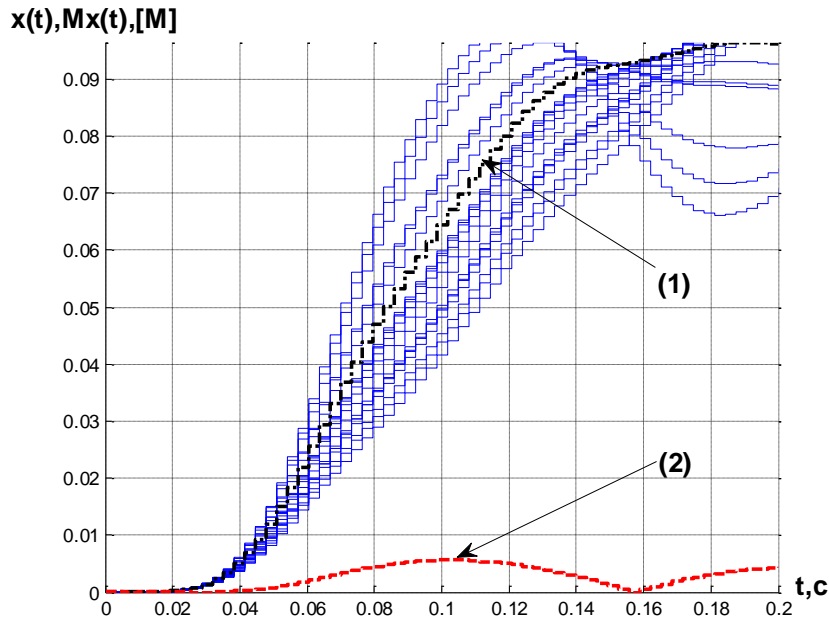


Рис. 2. Влияние случайности параметра h_3 на характер переходного процесса и его статические характеристики

Таким образом, в работе показано решение задачи статистического анализа электрогидравлического следящего привода с использованием его усредненной проекционной модели. Результат анализа говорит о заметном влиянии фактора случайности коэффициента вязкого трения на золотнике электрогидравлического усилителя на среднее квадратическое отклонение перемещения штока привода.

Список литературы

[1] *Латин С.В., Егунов Н.Д.* Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. – 496 с.

[2] *Пупков К.А., Егунов Н.Д., Макаренков А.М.* и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.

Тхан Хтайк Аунг – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: everlovecrazy@gmail.com

Чжо Свар Хейн – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: everlovecrazy@gmail.com

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГОРИТМА ОБРАТНОГО ОБХОДА ИНТЕГРАТОРА К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ОДНООСНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ ГИРОСКОПОМ С ИНТЕГРАТОРОМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

За последние несколько лет широкое применение нашли микроэлектромеханические системы (МЭМС). К таким системам относится и вибрационный гироскоп, основным механическим компонентом которого является чувствительная масса с двумя степенями свободы, способная вращаться в двух перпендикулярных направлениях на плоскости под действием упругих сил, сил трения и внешней вынуждающей силы. При этом через ускорение Кориолиса происходит передача энергии от оси приложения силы к оси измерения. Для определения угловой скорости вращения основания вибрационного гироскопа можно использовать отношение амплитуды вынужденных гармонических колебаний по оси ОХ (ось приложения силы) к амплитуде возбужденных колебаний по оси ОУ (ось измерения).

В [1] указано, что управление без обратной связи оказывается чувствительным к малым вариациям параметров системы, которые непременно возникают в технологическом цикле производства и эксплуатации МЭМС-гироскопов.

В настоящей статье рассматривается применимость алгоритма обратного обхода интегратора к задаче управления вибрационным гироскопом с интегратором на входе.

Объект управления. Рассмотрим математическую модель вибрационного гироскопа в векторной форме:

$$S_1 : \mathbf{q}'' + (\mathbf{D} + 2\mathbf{\Omega})\mathbf{q}' + \mathbf{K}_b\mathbf{q} = \mathbf{u}, \quad (1)$$

$$S_2 : \mathbf{u}' = \mathbf{v}, \quad (2)$$

где $\mathbf{q} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$, $\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$, $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_x & d_{xy} \\ d_{xy} & d_y \end{pmatrix}$, $\mathbf{K}_b = \begin{pmatrix} \omega_x & \omega_{xy} \\ \omega_{xy} & \omega_y \end{pmatrix}$,

$$\mathbf{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z \\ \Omega_z & 0 \end{pmatrix}, \quad \omega_x = m^{-1}k_{xx}, \quad \omega_y = m^{-1}k_{yy}, \quad \omega_{xy} = m^{-1}k_{xy}, \quad d_x = m^{-1}d_x^*,$$

$d_y = m^{-1}d_y^*$, $d_{xy} = m^{-1}d_{xy}^*$; x , y – перемещение чувствительной массы вдоль ортогональных осей ОХ и ОУ; m – масса чувствительного элемента; d_x^* , d_y^* , d_{xy}^* – коэффициенты демпфирования подвеса; k_{xx} , k_{yy} , k_{xy} – коэффициенты упругости подвеса; Ω_z – угловая скорость вращения основания вибрационно-

го гироскопа; u_x, u_y – внешние силы действующие в направлении осей ОХ и ОУ соответственно; v_x, v_y – управляющие воздействия.

Цель управления. Необходимо обеспечить желаемый уровень автоколебаний механической подсистемы S_1 и оценить угловую скорость вращения основания вибрационного гироскопа.

Желаемый уровень автоколебаний с частотами ω_1 и ω_2 задается с помощью явной эталонной модели гироскопа с развязанными каналами:

$$\mathbf{q}_m'' + \mathbf{K}_m \mathbf{q} = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{q}_m = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix}$, $\mathbf{K}_m = \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 \end{pmatrix}$.

Введем ошибку слежения $\mathbf{e} = (e_x \quad e_y)^T$, где $e_x = x - x_m$, $e_y = y - y_m$.

Формализуем цель управления в форме:

$$\|\mathbf{e}\| \leq \Delta, \text{ при } t \geq t_{\text{упр}}, \quad (4)$$

где $\Delta > 0$ – точность слежения.

Требуется синтезировать адаптивный алгоритм управления, обеспечив достижение цели управления (4) и оценить угловую скорость вращения основания вибрационного гироскопа в условиях параметрической неопределенности.

$$\hat{\Omega}_z \rightarrow \Omega_z, \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (5)$$

В предположении квазистационарности Ω_z по отношению к координатными возмущениями объекта управления (1) и (2), подлежащее измерению значение угловой скорости можно рассматривать как неизвестный параметр оцениваемый подсистемой адаптации [2].

Синтез алгоритма управления. Алгоритм обратного обхода интегратора, описанный в [3], позволяет синтезировать систему управления для системы (1), (2), при помощи обхода входного каскада (2).

Рассмотрим математическую модель по ошибке.

$$\begin{cases} \mathbf{e}'' + (\mathbf{D} + 2\mathbf{\Omega})\mathbf{q}' + \mathbf{K}_b \mathbf{q} - \mathbf{K}_m \mathbf{q}_m = \mathbf{u} \\ \mathbf{u}' = \mathbf{v} \end{cases} \quad (6)$$

Введем виртуальное управление выходным каскадом в виде:

$$\mathbf{u}_{\text{virt}} = (\mathbf{D} + 2\mathbf{\Omega})\mathbf{q}' + \mathbf{K}_b \mathbf{q} - \mathbf{K}_m \mathbf{q}_m - \mathbf{K}_1 \mathbf{e} - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}', \quad (7)$$

где \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 – некоторые диагональные положительно-определенные матрицы.

Найдем производную от виртуального управления (7):

$$\mathbf{u}'_{\text{virt}} = (\mathbf{D} + 2\mathbf{\Omega})\mathbf{q}'' + \mathbf{K}_b \mathbf{q}' - \mathbf{K}_m \mathbf{q}'_m - \mathbf{K}_1 \mathbf{e}' - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}'' \quad (8)$$

Введем новую переменную:

$$\mathbf{z} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{virt}}. \quad (9)$$

Проведем замену переменной \mathbf{u} в модели по ошибке (6) на выражение $\mathbf{z} + \mathbf{u}_{\text{virt}}$, полученное из формулы (9).

$$\begin{cases} \mathbf{e}'' = \mathbf{z} - \mathbf{K}_1 \mathbf{e} - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}' \\ \mathbf{z}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}'_{\text{virt}} \end{cases} \quad (10)$$

Приведем систему (10) к нормальной форме Коши.

$$\begin{cases} \mathbf{e}'_1 = \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}'_2 = \mathbf{z} - \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{z}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}'_{\text{virt}} \end{cases} \quad (11)$$

В качестве целевой функции выберем квадратичную форму:

$$V = \frac{1}{2} (\mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2^T \mathbf{e}_2 + \mathbf{z}^T \mathbf{z}). \quad (12)$$

Квадратичная форма (12) является неотрицательной, следовательно, она может быть кандидатом на роль функции Ляпунова. Для того чтобы целевая функция (12) являлась функцией Ляпунова, необходимо выполнение условия:

$$V' \leq 0. \quad (13)$$

Найдем производную от целевой функции (12):

$$V' = \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}'_1 + \mathbf{e}_2^T \mathbf{e}'_2 + \mathbf{z}^T \mathbf{z}' = \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_2^T (\mathbf{z} - \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2) + \mathbf{z}^T (\mathbf{v} - \mathbf{u}'_{\text{virt}}). \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что для того чтобы функция (12) являлась функцией Ляпунова, необходимо выбрать управление по входу \mathbf{v} в виде:

$$\mathbf{v} = \mathbf{u}'_{\text{virt}} - \mathbf{z} - \mathbf{e}_2. \quad (15)$$

Если \mathbf{K}_1 – единичная матрица, то целевая функция (12) будет удовлетворять условию (13), следовательно, будет являться функцией Ляпунова.

$$V' = -\mathbf{e}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2 - \mathbf{z}^T \mathbf{z} \leq 0 \quad (16)$$

Синтез алгоритма адаптации. В работе [2] отмечалось, что основное влияние на измерение скорости вращения оказывают перекрестные связи вибрационного гироскопа. Поэтому введем обозначение $\boldsymbol{\theta}_* = (d_{xy} \quad \Omega_z \quad \omega_{xy})^T$ – вектор «идеальных» параметров виртуального управления.

Заменим неизвестные параметры $\boldsymbol{\theta}_*$ в (7) на настраиваемые $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3)^T$. Тогда виртуальное управление будет иметь вид:

$$\mathbf{u}_{\text{virt}} = \begin{pmatrix} d_x & \theta_1 \\ \theta_1 & d_y \end{pmatrix} \mathbf{q}' + 2 \begin{pmatrix} 0 & -\theta_2 \\ \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{q}' + \begin{pmatrix} \omega_x & \theta_3 \\ \theta_3 & \omega_y \end{pmatrix} \mathbf{q} - \mathbf{K}_m \mathbf{q}_m - \mathbf{e} - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}'. \quad (17)$$

Выберем алгоритм адаптации в дифференциальной форме алгоритма скоростного градиента [2]:

$$\theta'_1 = -\gamma_1(e'_x y' + e'_y x'), \quad (18)$$

$$\theta'_2 = -\gamma_2(e'_x x' - e'_y y'), \quad (19)$$

$$\theta'_3 = -\gamma_3(e'_x y + e'_y x). \quad (20)$$

Результаты моделирования. График входного воздействия (15) представлен на рисунке 1.

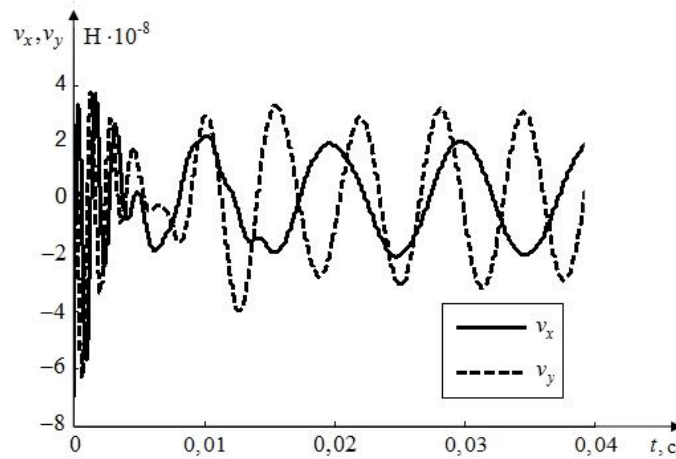


Рис. 1. Входное воздействие

Норма ошибки слежения, рассчитывается по формуле:

$$\|e\| = e^T e. \quad (21)$$

График нормы ошибки слежения и оценки угловой скорости вращения основания гироскопа представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

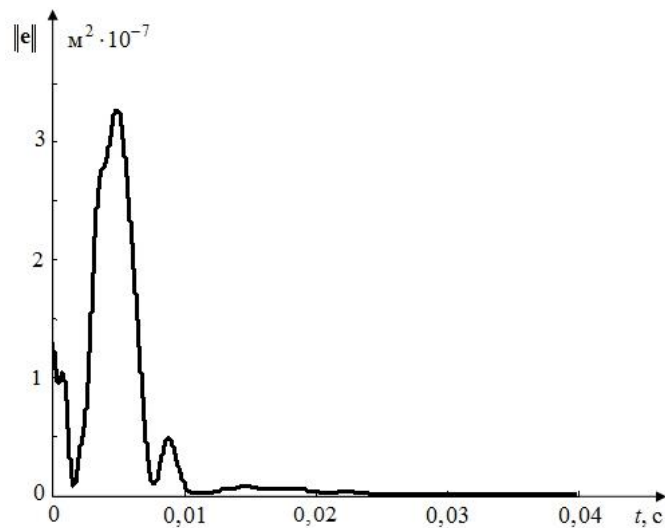


Рис. 2. Норма ошибки слежения

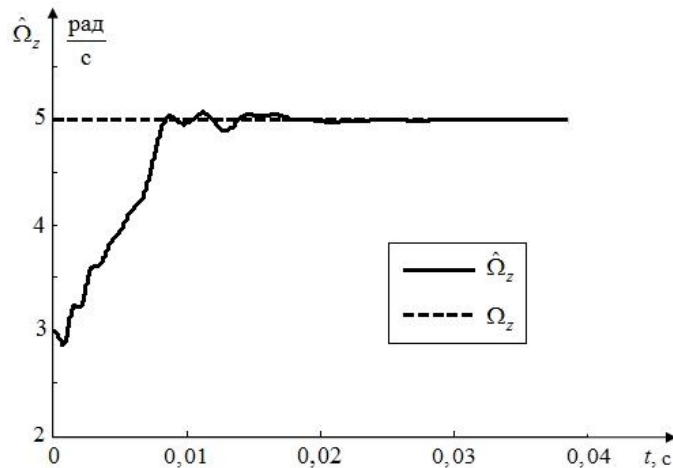


Рис. 3. Оценка угловой скорости вращения основания

Выводы. Для вибрационного гироскопа (1), (2) синтезирован алгоритм управления (15) с контуром адаптации (18), (19), (20). Достижение целей управления (4) и (5) подтверждено результатами математического моделирования (рисунки 2 и 3).

Список литературы

- [1] Бугров Д.И. Одноосный вибрационный гироскоп // *Фундаментальная и прикладная математика*. – 2005. – том 11. – № 8. – С.149–163.
- [2] Мышляев Ю.И., Финошин А.В., Тар Яр Мью. Метод скоростного биградиента в задаче управления вибрационным гироскопом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2015. – том 16. – № 11. – С.783–792.
- [3] Khalil H.K. *Nonlinear systems*, 2nd edition, 1996, Prentice-Hall, pp. 674–692.

Асатрян Тарон Араевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: taron.krlz@yandex.ru

Финошин Александр Викторович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: earlov@gmail.com

Мышляев Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: uimysh@mail.ru

Т.А. Асатрян, Нгуен Ти Тхань, Ю.И. Мышляев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПАССИФИКАЦИИ К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХЗВЕННЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ С ГИБКИМИ СОЧЛЕНЕНИЯМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Рассмотрим робототехническую систему, представляющую собой двухзвенный манипулятор с двумя степенями свободы (углы q_1 и q_2). Звенья представляют собой жесткие однородные стержни длиной l_1 и l_2 , и с моментами инерции J_1 и J_2 соответственно. Движение по углу q_1 обеспечивается электродвигателем с моментом инерции J_{m1} , вязким трением осей B_{m1} и внешним моментом на роторе τ_{m1} .

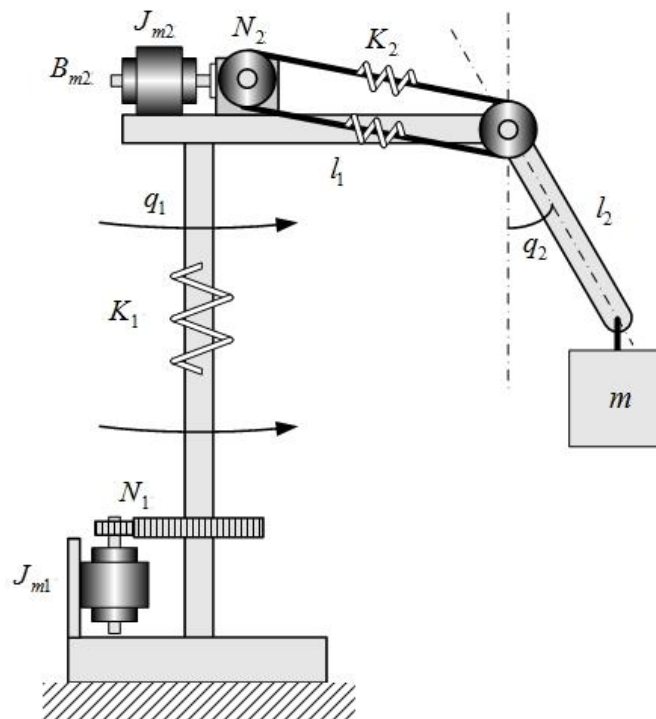


Рис. 1. Кинематическая схема двухзвенного манипулятора

Вал электродвигателя через редуктор с передаточным числом N_1 соединен с вертикальной, упруго скручивающейся осью манипулятора с коэффициентом упругого скручивания K_1 . Второе звено (стержень l_2) одним концом через осевое соединение связано с первым звеном и приводится в движение электродвигателем с моментом инерции J_{m2} , вязким трением осей B_{m2} и внешним моментом на роторе τ_{m2} через редуктор с передаточным числом N_2 . Выходной вал редуктора соединен со звеном l_2 с помо-

щью зубчатого ремня с коэффициентом упругости по угловой передаче k_2 . На втором конце звена l_2 находится груз массой m .

Рассмотрим математическую модель двухзвенного манипулятора в векторной форме:

$$S_1 : \mathbf{J}\mathbf{q}'' + \mathbf{E}\mathbf{q}' + \mathbf{G} = \mathbf{M}, \quad (1)$$

$$S_2 : \mathbf{J}_m\mathbf{q}_m'' + \mathbf{B}_m\mathbf{q}_m' + \mathbf{N}^{-1}\mathbf{M} = \boldsymbol{\tau}_m, \quad (2)$$

где $\mathbf{q} = (q_1 \quad q_2)^T$, $\mathbf{q}_m = (q_{m1} \quad q_{m2})^T$, $\boldsymbol{\tau}_m = (\tau_{m1} \quad \tau_{m2})^T$, $\mathbf{M} = \mathbf{K}(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{q}_m - \mathbf{q})$,

$$\mathbf{J}_m = \begin{pmatrix} J_{m1} & 0 \\ 0 & J_{m2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_m = \begin{pmatrix} B_{m1} & 0 \\ 0 & B_{m2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{pmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ mgl_2 \sin(q_2) + \frac{3J_2}{l_2^2} g \frac{l_2}{2} \sin(q_2) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \xi q_2' & \xi q_1' \\ -\xi q_1' & 0 \end{pmatrix},$$

$$\xi \equiv \frac{3J_2}{l_2^2} (l_1 + \frac{l_2}{2} \sin(q_2)) \frac{l_2}{2} \cos(q_2) + m(l_1 + l_2 \sin(q_2)) l_2 \cos(q_2) + \frac{J_2}{4} \sin(q_2) \cos(q_2),$$

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_1 + \frac{3J_2}{l_2^2} (l_1 + \frac{l_2}{2} \sin(q_2))^2 + m(l_1 + l_2 \sin(q_2))^2 + \frac{J_2}{4} \sin^2(q_2) & 0 \\ 0 & J_2 + ml_2^2 \end{pmatrix}.$$

Цель управления. Целью управления является слежение за постоянным сигналом. Введем ошибку слежения $\mathbf{e} = (e_1 \quad e_2)^T$, где $e_1 = q_1 - q_1^*$, $e_2 = q_2 - q_2^*$, q_1^* и q_2^* – желаемые положения звеньев манипулятора.

Формализуем цель управления в виде:

$$\|\mathbf{e}\| \rightarrow 0, \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Синтез алгоритма управления. Алгоритм управления синтезируется в 2 этапа. На первом этапе выбирается управление для выходного каскада, а на втором этапе обеспечивается динамика входного каскада (подсистемы приводов) для достижения цели управления (3).

Этап 1. Выходной каскад описывается в Лагранжевой форме. В [1] показано что управление вида:

$$\mathbf{M} = \mathbf{J}\mathbf{q}_r'' + \mathbf{E}\mathbf{q}_r' + \mathbf{G} + \mathbf{u}, \quad (4)$$

где $\mathbf{q}_r' = \mathbf{q}' - \mathbf{q}'^*$, \mathbf{u} – новый вход, пассивирует систему (1), если в качестве выхода взять $\mathbf{y} = \mathbf{q}' - \mathbf{q}_r'$, а на роль функции запаса выбрать кинетическую энергию $V = 0,5(\mathbf{y}^T \mathbf{J} \mathbf{y})$, и воздействие по новому входу $\mathbf{u} = -\mathbf{y}$.

Из управления (4) можно выделить желаемую динамику входного каскада (подсистемы приводов). Подставим (4) в выражение

$\mathbf{M} = \mathbf{K}(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{q}_m - \mathbf{q})$ и выделим оттуда \mathbf{q}_m которая будет являться желаемой динамикой входного каскада (обозначим ее как \mathbf{q}_m^*):

$$\mathbf{q}_m^* = (\mathbf{KN}^{-1})^{-1} (-\mathbf{J}\mathbf{q}' - \mathbf{E}\mathbf{q} + \mathbf{E}\mathbf{q}^* + \mathbf{G} - \mathbf{q}' - \mathbf{q} + \mathbf{q}^*) - \mathbf{K}\mathbf{q}. \quad (5)$$

Найдем производную по времени от (5):

$$\mathbf{q}_m'^* = (\mathbf{KN}^{-1})^{-1} (-\mathbf{J}'\mathbf{q}' - \mathbf{J}\mathbf{q}'' - \mathbf{E}'\mathbf{q} - \mathbf{E}\mathbf{q}' + \mathbf{E}'\mathbf{q}^* + \mathbf{G}' - \mathbf{q}'' - \mathbf{q}') - \mathbf{K}\mathbf{q}'. \quad (6)$$

Этап 2. Для входного каскада выделим внутреннюю и внешнюю динамику, как показано в [2].

Запишем (2) в виде передаточной функции:

$$\mathbf{W}(s) = \frac{\mathbf{b}}{s^2 + \mathbf{a}_1s + \mathbf{a}_0}, \quad (7)$$

где $\mathbf{a}_0 = \mathbf{J}_m^{-1}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{KN}^{-1}$, $\mathbf{a}_1 = \mathbf{J}_m^{-1}\mathbf{B}_m$, $\mathbf{b} = \mathbf{J}_m^{-1}$.

При этом управление будет включать в себя компенсацию слагаемого $\mathbf{N}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{q}$.

Относительная степень передаточной функции (7) равна двум. Для понижения относительной степени введем последовательно форсирующее звено с передаточной функцией:

$$\mathbf{g}(s) = \mathbf{g}_1s + \mathbf{g}_0 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix} s + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Найдем новую передаточную функцию системы с форсирующим звеном:

$$\mathbf{W}(s)\mathbf{g}(s) = \frac{\mathbf{b}\mathbf{g}_1s + \mathbf{b}\mathbf{g}_0}{s^2 + \mathbf{a}_1s + \mathbf{a}_0} = \frac{\mathbf{b}_1s + \mathbf{b}_0}{s^2 + \mathbf{a}_1s + \mathbf{a}_0}. \quad (9)$$

Согласно [3], для выделения внутренней и внешней динамики системы (2), необходимо произвести преобразование вида:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Z} \\ \mathbf{y}_{\text{inf}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_m \\ \mathbf{q}_m' \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Путем дифференцирования системы (10) осуществим переход к форме:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}' = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{B}_z\mathbf{y}_{\text{inf}} \\ \mathbf{y}_{\text{inf}}' = \mathbf{a}_y\mathbf{y}_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{u} \end{cases} \quad (11)$$

где $\mathbf{A}_z = -\mathbf{a}_1 - \frac{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_1}$, $\mathbf{B}_z = \mathbf{a}_1 + \frac{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_1} + \frac{\mathbf{a}_0\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1}$, $\mathbf{a}_y = -\frac{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_1}$, $\tilde{\mathbf{a}}_z = \frac{\mathbf{b}_0 - \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_1}$, $\mathbf{B} = \mathbf{b}_1$.

Синтезируем алгоритм управления в виде:

$$\tau_m = -\mathbf{B}^{-1} \left(\mathbf{a}_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} - \mathbf{q}_m^* + \gamma (\mathbf{y}_{\text{inf}} - \mathbf{q}_m^*) \right) - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{q}, \quad (12)$$

где γ – диагональная положительно-определенная матрица коэффициентов усиления.

Результаты моделирования. На рисунка 2 и 3 приведены графики угловых координат q_1 и q_2 . В качестве желаемого значения углов были выбраны углы 1 радиан для первого звена и 2 радиана для второго. Начальные условия – нулевые.

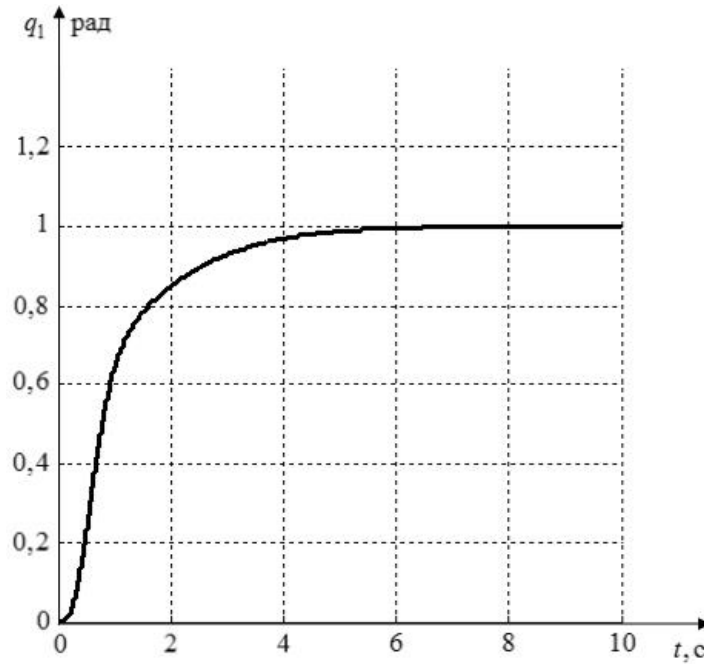


Рис. 2. График изменения угла поворота первого звена

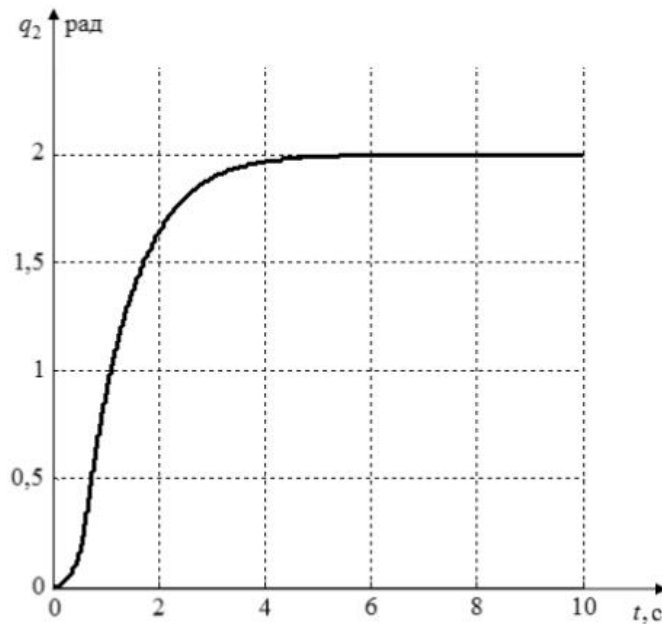


Рис. 3. График изменения угла поворота второго звена

Выводы. В данной статье исследована применимость метода пассивности к задаче управления двухзвенным манипулятором с гибкими сочленениями (1), (2), синтезирован алгоритм управления (4), (12) позволяющий достигнуть цели управления (3). Работоспособность алгоритма подтверждена математическим моделированием (рисунки 2 и 3).

Список литературы

[1] *Полушин И.Г., Фрадков А.Л., Хилл Д.Д.* Пассивность и пассивфикация нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 3. – С.3–37.

[2] *Khalil H.K.* Nonlinear systems, 2nd edition, 1996, Prentice-Hall, pp. 611–632.

[3] *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.

Асатрян Тарон Араевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: taron.krlz@yandex.ru

Нгуен Ти Тхань – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nct1101@gmail.com

Мышляев Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: uimysh@mail.ru

Д.А. Баранов, В.И. Краснощеченко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФРАКРАСНОГО ДАТЧИКА РАССТОЯНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ SHARP ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ РОБОТОМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для обнаружения предметов и определения расстояния до них в задачах управления в настоящее время используются различные типы датчиков. На данный момент на отечественном рынке специального оборудования можно приобрести различные виды датчиков необходимых для измерения расстояния. Наиболее популярными являются следующие разновидности датчиков:

- инфракрасные датчики расстояния – этот вариант устройства использует для определения расстояния инфракрасный луч;
- оптические – что касается оптических датчиков, то по уверению специалистов этот прибор имеет весьма широкий диапазон, который варьируется в промежутке от 1 мм до 30 м;
- индуктивные – этот тип устройства необходим для того, чтобы замерять габаритные размеры предметов, выполненных из металла, а также для того, чтобы определять их форму;
- лазерные – в этом случае для замера расстояния используется лазерный луч. В процессе измерения можно задать разрешение: от 0,01 мм до 0,1 мм;
- ультразвуковые – чтобы получить данные относительно расстояния используется ультразвуковой луч, который свободно огибает любые незначительные преграды и предметы.

Фактически работа датчиков расстояния сводится к тому, что прибор посылает сигнал (лазерный луч, ультразвуковое излучение, ИК-луч или магнитный поток) и в конечном итоге получает два результата. Расстояние до конечной точки и расстояние до первоначальной его стороны. Так при разности этих двух замеров можно получить размер объекта. Именно это обозначение и будет выводиться на экран.

Рассмотрим более подробно устройство и принцип работы инфракрасного датчика в задаче управления транспортным роботом.

ИК - Дальномер содержит в одном корпусе приемник и передатчик инфракрасного диапазона, предназначен для определения расстояния до объектов в пределах от 4 до 40 сантиметров.

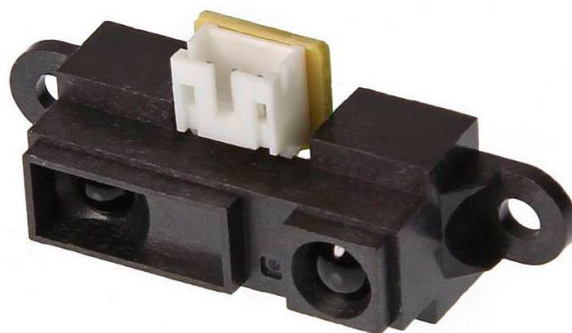


Рис. 1. Датчик расстояния SHARP GP2D120

На Рис.2 приведен типичный график зависимости напряжения от расстояния датчика Sharp. Как видно он не является линейным. К тому же минимально измеряемое расстояние ограничено особенностями датчика. Выходное напряжение резко падает на определенном расстоянии и 1 значению напряжения соответствует 2 расстояния, об этом необходимо помнить при работе с сенсором.

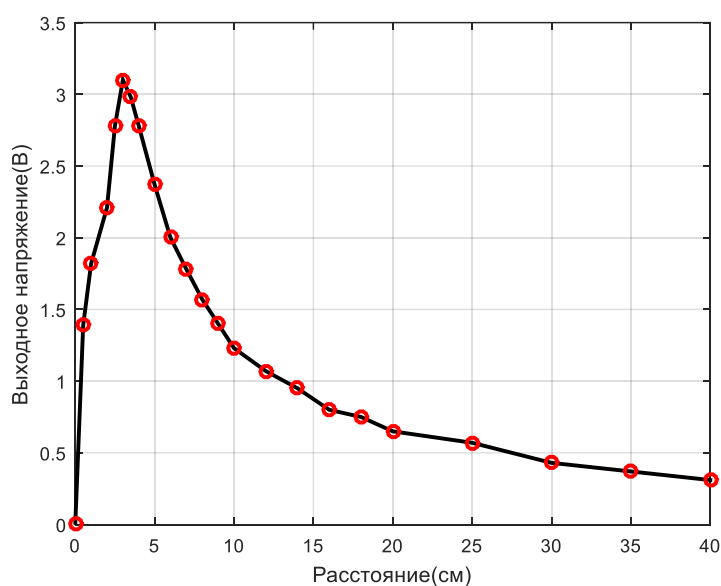


Рис. 2. График зависимости выходного напряжения от расстояния до объекта

Выход датчика аналоговый. То есть, напряжение на нем пропорционально расстоянию до препятствия. Вместе с тем, как и в случае с ультразвуком, для датчика есть разница между разными типами препятствий.

В связи с этим в даташите Sharp приводит данные при использовании в качестве отражателей эталонных карточек Kodak с коэффициентом отражения 90%. Судя по нему, на 20 см датчик выдает 1.3В. Давайте сравним с экспериментальными данными, которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1

	Белая бумага	Рука	Черная поверхность
Измерения	32	27	21
	31	27	21
	32	28	22
	31	27	23
	32	28	21
	31	28	21
	32	28	22
	32	28	22
	32	27	22
	32	28	22
Среднее	31,7	27,6	21,7
Напряжение	1,36	1,35	1,28

Вместе с тем, есть и специфика. Суть в том, что когда препятствие находится ближе нижней границы радиуса действия (4 см), датчик начинает считать, что препятствие, наоборот, удаляется.

В связи с этим, был проведен ряд экспериментов, результаты которого сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Ближе 5см	5 см	10 см	15 см	20 см	30 см	40 см
138	109	59	40	30	22	6
100	112	62	42	32	23	5
6	114	60	41	31	23	8
13	108	59	41	31	22	13
47	107	61	41	31	22	12
140	105	62	42	32	23	7
4	106	62	42	32	23	9
26	110	61	41	31	23	11
68	112	62	42	31	23	14
130	110	60	42	31	22	6
	109,3	60,8	41,4	31,2	22,6	9,1

Отсюда вывод: хотя для многих целей даташит вполне адекватен, иногда имеет смысл провести эксперименты. И это особенно актуально, если датчик несколько заглублен, а значит, может получать отражения от стенок или других элементов корпуса.

Список литературы

[1] Датчик измерения расстояния [Электронный ресурс] URL: <http://robocraft.ru/> (дата обращения: 29.03.2017).

[2] Триангуляционный метод измерения [Электронный ресурс] URL: <http://www.sensorica.ru> (дата обращения: 29.03.2017).

Баранов Дмитрий Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Dima.Baranow2@yandex.ru

Краснощеченко Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 2kviip@yandex.ru

Паинг Пью У, В.И. Краснощеченко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ И ФОРМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НАГРУЖЕННОЙ РУКИ ОДНОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В данной работе рассматривается задача построения математической модели гибкого однозвеного манипулятора с различными нагрузками схвата. В основе построения математической модели лежит уравнение Эйлера-Вернулли. Решение данного уравнения с использованием граничных условий и метода разделения переменных Фурье позволило определить собственные частоты и формы колебаний манипулятора.

1. Модель Эйлера-Вернулли.

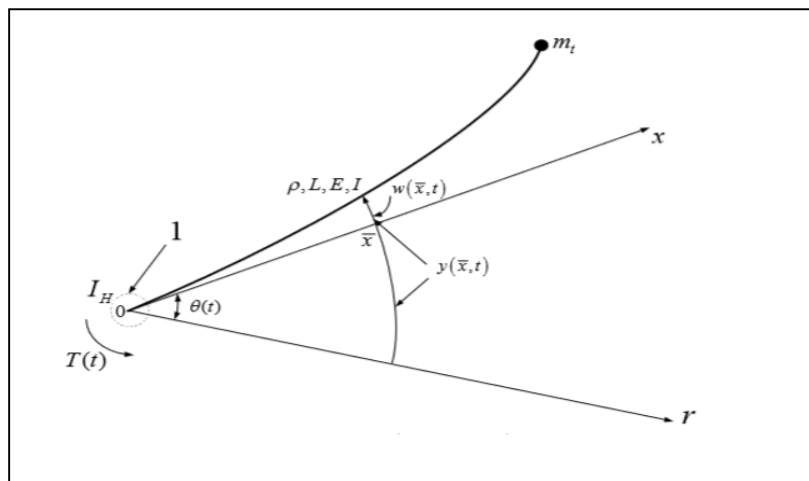


Рис. 1. Схема гибкой руки робота

Рассмотрим схему гибкой руки робота, изображенную на рис.1.

Пусть переменная $y(\bar{x}, t)$ определяется выражением:

$$y(\bar{x}, t) = w(\bar{x}, t) + \bar{x}\theta(t). \quad (1)$$

Здесь y – полное отклонение. Уравнение однозвеной гибкой руки относительно этой переменной является уравнением в частных производных четвертого порядка:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Здесь $S = hb$ – площадь поперечного сечения звена, $h \ll b$.

Согласно методу разделения переменных общее решение уравнения (2) может быть записано в виде:

$$y(x,t) = \sum_{i=0}^{\infty} \phi(x) q_i(t), \quad (3)$$

где $i=0$ соответствует движению руки как абсолютно жесткого тела ($\phi_0(x)=0$). Запишем граничные условия с учетом (3).

Условие неподвижности заделанного конца звена $x=0$:

$$\phi(0) = 0. \quad (4)$$

Условие отсутствия действия на свободном конце изгибающего момента:

$$\phi''(L) = 0. \quad (5)$$

Уравнение движения перемещаемого точечного объекта массы m :

$$EI\phi'''(L) = -\omega^2 m_t \phi(L). \quad (6)$$

Изгибающий момент на заделанном конце уравновешивается инерционными силами соединения:

$$EI\phi'''(0) = -\omega^2 I_h \phi'(0), \quad (7)$$

I_h - момент инерции вала, на котором закреплено звено манипулятора.

Уравнения (2)-(7) составляют динамическую модель рассматриваемой системы при следующих допущениях; не учитываются деформации сдвига; принят пренебрежимо малым момент инерции звена относительно продольной оси.

2. Определение частот и форм собственных колебаний нагруженной руки робота

Согласно (3) решение уравнения (2) имеет вид:

$$y(x,t) = \phi(x) q(t). \quad (8)$$

Подставляя данную форму решения в (2), имеем:

$$\frac{q''(t)}{a^2 q(t)} = -\frac{\phi^4(x)}{\phi(x)} = -\lambda, \quad (9)$$

где $a = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$.

Для функции $\phi(x)$ получаем задачу о собственных значениях:

$$\phi^{(4)}(x) - \lambda \phi(x) = 0. \quad (10)$$

Общее решение уравнения (10) представляется в виде:

$$\phi(x) = C_1 \sin(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_2 \cos(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_3 \sinh(\sqrt[4]{\lambda x}) + C_4 \cosh(\sqrt[4]{\lambda x}). \quad (11)$$

Подставляя (11) в уравнения (4)-(7), получаем:

$$C_2 + C_4 = 0; \quad (12)$$

$$-C_1 \sin \sqrt[4]{\lambda L} - C_2 \cos \sqrt[4]{\lambda L} + C_3 \sinh \sqrt[4]{\lambda L} + C_4 \cosh \sqrt[4]{\lambda L} = 0; \quad (13)$$

$$EI\lambda^{\frac{3}{4}}\left(-C_1\cos\sqrt[4]{\lambda L}+C_2\sin\sqrt[4]{\lambda L}+C_3\cosh\sqrt[4]{\lambda L}+C_4\sinh\sqrt[4]{\lambda L}\right)=; \quad (14)$$

$$=-\omega^2m_l\left(C_1\sin\sqrt[4]{\lambda L}+C_2\cos\sqrt[4]{\lambda L}+C_3\sinh\sqrt[4]{\lambda L}+C_4\cosh\sqrt[4]{\lambda L}\right)$$

$$EI(C_4-C_2)\sqrt[4]{\lambda L}=-\omega^2I_h(C_1+C_3). \quad (15)$$

Эта однородная система имеет нетривиальные решения C_1 и C_2 если определитель системы равен нулю. Приравнивая этот определитель нулю, получаем трансцендентное уравнение для вычисления собственных значений:

Последовательно выражая из условий (12),(14),(15) значения коэффициентов C_1, C_3, C_4 через C_2 и подставляя результаты в (11), получаем выражение для соответствующей собственной функции:

$$\phi_i(x)=C_2\left[\frac{\frac{2EI\sqrt[4]{\lambda_i}}{\omega_i^2I_h}\sinh\sqrt[4]{\lambda_i}L-\cos\sqrt[4]{\lambda_i}L-\cosh\sqrt[4]{\lambda_i}L}{\sin\sqrt[4]{\lambda_i}L+\sinh\sqrt[4]{\lambda_i}L}\sin\sqrt[4]{\lambda_i}x+\right. \\ \left.+\frac{2EI\sqrt[4]{\lambda_i}}{\omega_i^2I_h}-\frac{\frac{2EI\sqrt[4]{\lambda_i}}{\omega_i^2I_h}\sinh\sqrt[4]{\lambda_i}L-\cos\sqrt[4]{\lambda_i}L-\cosh\sqrt[4]{\lambda_i}L}{\sin\sqrt[4]{\lambda_i}L+\sinh\sqrt[4]{\lambda_i}L}\right]\sinh\sqrt[4]{\lambda_i}x+\cos\sqrt[4]{\lambda_i}x-\cosh\sqrt[4]{\lambda_i}x, \quad i=1,2,\dots \quad (16)$$

В данной работе диапазон изменения перемещаемой массы 0,01 кг – 0,3 кг. В таблице 1 представлены значения для собственных частот первой и второй форм колебаний в зависимости от величины нагрузки.

На рисунке 2 представлены полученные графики первых двух собственных форм (мод) колебаний для нагрузки $m_L = 0$ кг:

Таблица 1.

$m_l, \text{кг}$	0	0,15	0,2	0,25	0,3
$\omega_1, \text{рад} / \text{с}$	42,16	11,1	10,05	9,29	8,70
$\omega_2, \text{рад} / \text{с}$	122,7	53,9	52,45	51,33	50,44
$\phi_1'(0)$	-6,25	-1,9	-1,82	-1,75	-1,69
$\phi_2'(0)$	-12,6	7,24	7,15	-7,07	7,02
$\phi_1'(L)$	2,21	,0,42	-0,50	-0,54	-0,57
$\phi_2'(L)$	-2,0	-0,9	-0,88	0,8	-0,74

Собственный частот первой и второй форм колебаний в зависимости от величины нагрузки

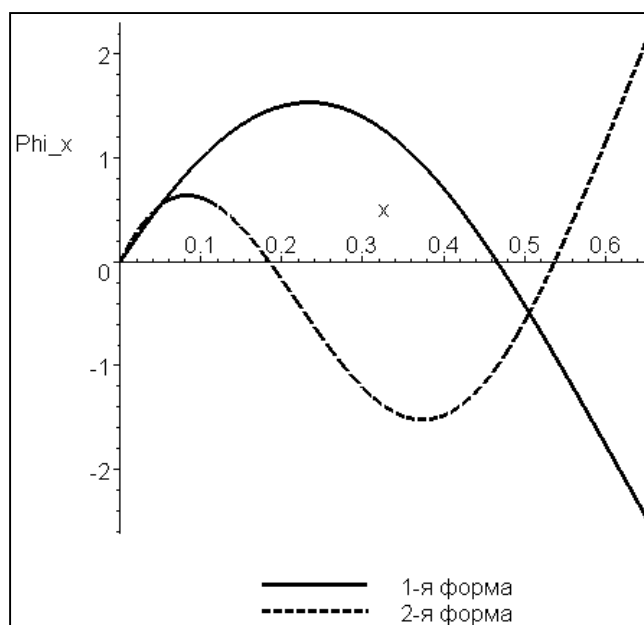


Рис. 2. Графики собственных форм ГОЗМ для нагрузки 0 кг

Список литературы

[1] Hyde, J. M., Seering, W. P. (1991) Using input command pre-shaping to suppress multiple mode vibration. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2604–2609.

[2] De Luca, A., Di Giovanni, G. (2001) Rest-to-rest motion of a one-link flexible forearm. 2001 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 923–928 Book, W. J. (1990) Modeling, design, and control of flexible manipulator arms: A tutorial review. 29th IEEE Conf. on Decision and Control, 500–506 4.

Паинг Пью У – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: rainghtetphyonaing@gmail.com

Краснощеченко Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 2kviip@yandex.ru

Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЕРВОПРИВОДА С УЧЕТОМ ФАКТОРА СЛУЧАЙНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА СЖАТИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) как силовой привод в составе систем автоматического управления широко используется в авиации, ракетостроении, робототехнике, транспортном машиностроении, энергетике и других подобных областях. Требования к точности и качеству современных систем автоматического управления делают актуальной задачу повышения точности ЭГСП как их важного элемента. Данной проблеме посвящена настоящая работа, в которой рассматривается опыт применения усредненных проекционных моделей стохастических систем [1] для оптимизации параметров ПИД-регулятора и дополнительного корректирующего устройства в составе ЭГСП с учетом влияния фактора случайности физических параметров ЭГСП.

Использование проекционных моделей и методов теории матричных операторов [2] при решении задач теории управления наиболее эффективно для линейных систем, поэтому в настоящей работе в качестве исходной модели рассматривается линеаризованная математическая модель ЭГСП с ПИД-регулятором и корректирующим устройством, которая после приведения к стандартной форме вход-выход имеет вид:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i}{dt^i} y(t) = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^j}{dt^j} u(t), \quad (1)$$

где все или некоторые коэффициенты a_i , b_j являются случайными величинами, определяемыми как

$$a_i = m_{a_i} + \tilde{a}_i, i = \overline{0, n-1}, b_j = m_{b_j} + \tilde{b}_j, j = \overline{0, m}, \quad (2)$$

где m_{a_i} , m_{b_j} – математические ожидания, \tilde{a}_i , \tilde{b}_j – центрированные случайные величины, $u(t)$ – напряжение на суммирующем входе электронного усилителя сигнала ошибки (входной сигнал ЭГСП); $y(t)$ – перемещение штока поршня гидроцилиндра (выходной сигнал ЭГСП). Условие физической реализуемости системы (1) формулируется как $n \geq m$. При принятых упрощающих допущениях $n = 7$ и $m = 3$.

Задача оптимизации параметров регуляторов формулируется следующим образом. Требуется найти оптимальные параметры ПИД-регулятора

k_{II}, k_{II}, k_D и корректирующего устройства k_ϕ, k_T обеспечивающие желаемые динамические характеристики ЭГСП с учетом случайности коэффициента сжатия рабочей жидкости $k_{сж}$. Желаемые динамические характеристики задаются функцией эталонного переходного процесса $x_3(t) = 0,1(1 - e^{-20t})$, [м], который должен иметь место при подаче на вход ЭГСП ступенчатого сигнала $y(t) = 0,01 \cdot H(t)$, [В]. Так как входной сигнал в рассматриваемом примере принят случайным, то $x_3(t) = m_{x_3}(t)$ и $y(t) = m_y(t)$. Корреляционная функция входного сигнала $R_{yy}(t_1, t_2) = 4,5 \cdot 10^{-5} e^{-10|t_1 - t_2|}$, [В²], и он полагается гауссовым процессом. Случайный параметр $k_{сж}$ являются нормально распределенной случайной величиной, для которой определены математическое $m_{k_{сж}} = 10,2350 \cdot 10^{-11} \left[\frac{M^5}{H} \right]$ и дисперсия $D_{k_{сж}} = 1,9 \cdot 10^{-23} \left[\frac{M^{10}}{H^2} \right]$.

Предлагается способ минимизации влияния фактора случайности параметров ЭГСП путем дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства, найденных без учета влияния фактора случайности параметров ЭГСП. Вектор $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ будет состоять из пяти элементов: $p_1 = k_{II}, p_2 = k_{II}, p_3 = k_D$ для ПИД-регулятора и $p_4 = k_\phi, p_5 = k_T$ для корректирующего устройства.

Оптимальные значения параметров регуляторов предлагается искать в два этапа. На первом этапе решается задача определения значений параметров $k_{II}, k_{II}, k_D, k_\phi, k_T$ для детерминированной модели ЭГСП (эквивалентной детерминированной системы). Данная задача может решаться любым из известных методов параметрического синтеза регуляторов детерминированных систем. Например, известен проекционный метод синтеза регуляторов, основанный на минимизации функционала, построенного с использованием проекционной модели системы. Данный функционал имеет следующий вид:

$$J_1(\mathbf{p}) = \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right]^T \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right], \quad (3)$$

где \mathbf{C}^{x_3} – проекционная характеристика эталонного переходного процесса $x_3(t)$; $\mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p})$ – расчетная проекционная характеристика переходного процесса $x_p(t, \mathbf{p}) = \bar{x}(t)$, вычисленная по проекционной модели эквивалентной детерминированной системы для некоторых значений параметров регулятора (элементов вектора \mathbf{p}); T – знак транспонирования.

На первом этапе искались значения $k_{II}, k_{II}, k_{D}, k_{\phi}, k_{T}$ без учета случайности физического параметра ЭГСП ($k_{сжс} = m_{к_{сжс}}$) путем минимизации функционала (3) методом Нелдера-Мида при начальных значениях параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства $k_{II}=1, k_{II}=0, k_{D}=0, k_{\phi}=0, k_{T}=0$. В результате были найдены следующие значения: $k_{II}=2,6501, k_{II}=0,0031, k_{D}=0,0107, k_{\phi}=9e-11, k_{T}=0,0412$. Переходный процесс до и после оптимизации имеет вид, представленны на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

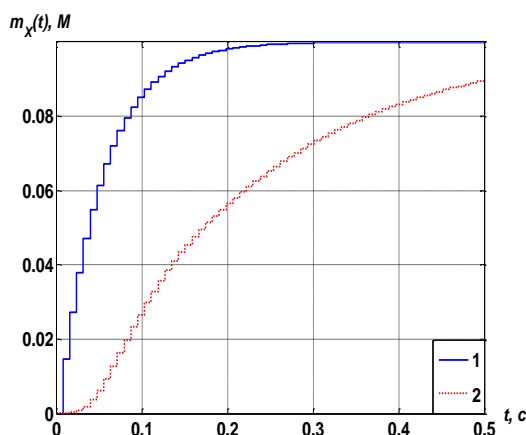


Рис. 1. Выходной сигнал (1 – эталон; 2 – до первого этапа оптимизации)

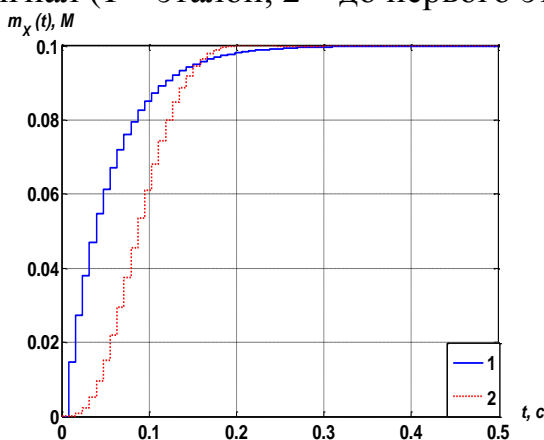


Рис. 2. Выходной сигнал (1 – эталон; 2 – после первого этапа оптимизации)

На втором этапе выполняется повторная оптимизация параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства с учетом влияния случайности параметров системы путем минимизации функционала:

$$J_2(\mathbf{p}) = \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ – элементы квадратных матриц $\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$, определяемых, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})[\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})]^\top - \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}(\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}})^\top, \mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$; $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$.

На втором этапе искались значения $k_P, k_I, k_D, k_\phi, k_T$ с учетом случайности физического параметра $k_{сж}$ путем минимизации функционала (4) тем же методом при начальных значениях $k_P = 2,6501$, $k_I = 0,0031$, $k_D = 0,0107$, $k_\phi = 9e-11$, $k_T = 0,0412$ найденных на первом этапе. В результате были найдены следующие значения: $k_P = 2,6518$, $k_I = 0,0051$, $k_D = 0,0621$, $k_\phi = 1,7e-10$, $k_T = 0,0251$.

Результаты оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства для стохастической модели ЭГСП представлены на рис. 3 и рис. 4 (кривая 1 – для детерминированной модели после первого этапа оптимизации; кривая 2 – для стохастической модели после первого этапа оптимизации; кривая 3 – для стохастической модели после второго этапа оптимизации)

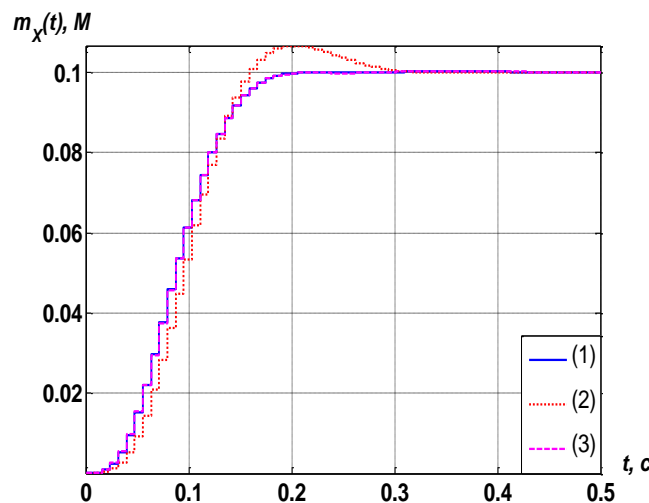


Рис. 3. Математическое ожидание

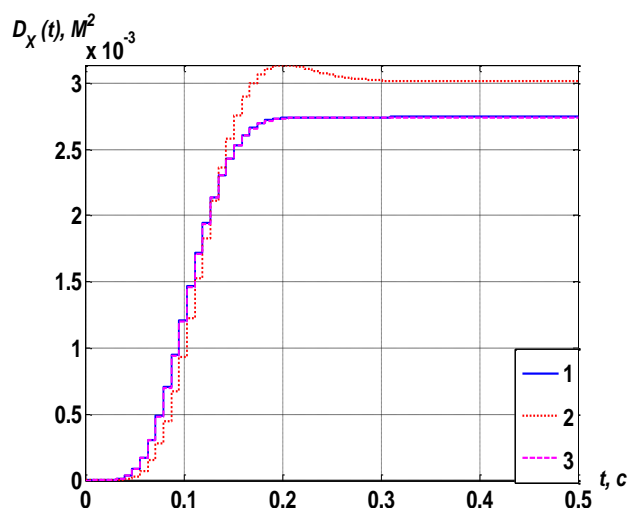


Рис.4. Дисперсия

Из графика рис. 3 видно, что на втором этапе оптимизации удалось заметно улучшить качество переходного процесса по математическому ожиданию (кривая 3 по сравнению с кривой 2), приблизив его к переходному процессу эквивалентной детерминированной системы (кривая 1). Кроме того, график рис. 4 демонстрирует эффект существенного уменьшения дисперсии переходного процесса в установившемся режиме (кривая 3 по сравнению с кривой 2). Видно, что дисперсия выходного сигнала приближаются к дисперсии выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы (кривая 1).

Таким образом, предлагается метод оптимизации параметров регуляторов и корректирующих устройств систем автоматического управления, позволяющий учесть влияние случайного разброса параметров объекта управления. По сравнению с традиционным подходом, предлагаемый метод обеспечивает лучшее качество регулирования и, как следствие, более высокую точность работы системы управления в целом.

Список литературы

[1] Пупков К.А., Егунов Н.Д., Макаренков А.М., Трофимов А.И. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.

[2] Лапин С.В., Егунов Н.Д. Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. – 496 с.

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyuaw87@gmail.com

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

Н.В. Аксенов, Ю.П. Корнюшин

ОПЫТ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВИБРОГЕНЕРАТОРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Постановка задачи. Летательные аппараты, транспортные средства, энергетическое оборудование, элементы автоматики, радиоэлектроники и информационно-измерительная аппаратура в эксплуатационных условиях испытывают различные виды воздействий: климатических, акустических, линейных ускорений, вибраций, ударов и пр. Повышение надежности, долговечности и качества функционирования упомянутых объектов и их элементов достигается проведением различных типов испытаний, в число которых входят лабораторные испытания, где моделируются условия, близкие к реальным условиям эксплуатации.

Для проведения испытаний изделий на вибрационные нагрузки применяются различные вибрационные стенды и комплексы. Чтобы воздействия, формируемые вибростендами, в наибольшей степени соответствовали реальным условиям эксплуатации, необходима система управления, учитывающая инерционные свойства виброгенератора с присоединенной массой в виде испытываемого изделия. При разработке таких систем первой решаемой задачей является задача идентификации динамических характеристик виброгенератора.

В настоящей работе представлен опыт идентификации вибрационного стенда TIRA_{vib} S 514. Он включает в себя виброгенератор с максимальным перемещением 13 мм и ускорением 89g, и усилитель мощностью 500Вт.

Описание подхода. Для построения математической модели вибрационного стенда и нахождения численных значений параметров модели необходимо получать частотные характеристики виброгенератора.

Снятие частотных характеристик выполнено с использованием микроконтроллера (МК) под управлением ЭВМ, что минимизировало участие человека в данной операции. Функциональная схема установки для снятия частотных характеристик приведена на рис. 1.

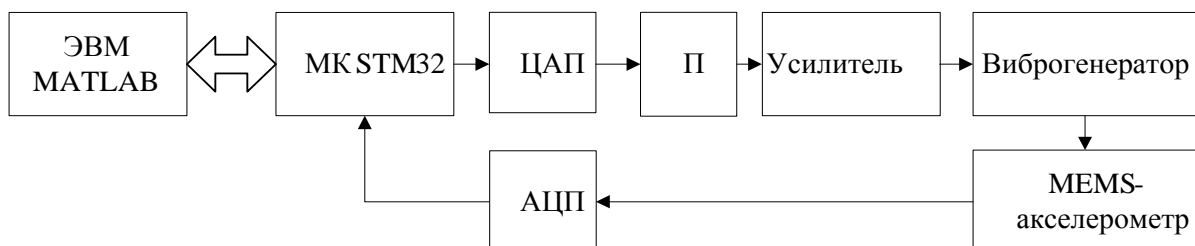


Рис. 1. Схема получения частотных характеристик

Блок “ЭВМ MATLAB” представляет собой компьютер с установленным программным обеспечением MATLAB. Среда MATLAB имеет возможность непосредственного обращения к последовательным интерфейсам компьютера (COM-порт) для организации связи с микроконтроллером. Блок “МК STM-32” представляет собой отладочную плату с 32-битным микроконтроллером фирмы STMicroelectronics, содержащую модули ЦАП и АЦП. Блок преобразователя “П” необходим для формирования двухполярного сигнала из однополярного, формируемого ЦАП. Блоки “Усилитель” и “Виброгенератор” являются объектом исследования. “MEMS-акселерометр” является датчиком, который крепится на вибростолу, и измеряет ускорение [1].

Для получения значения амплитудно-частотной характеристик (АЧХ) $A(\omega_0)$ и фазо-частотной характеристик (ФЧХ) $\varphi(\omega_0)$, на виброгенератор подается синусоидальный сигнал выбранной частоты ω_0 , выдерживается время переходного процесса, после чего записывается сигнал с датчика. Процесс повторяется для всего исследуемого диапазона частот с заданным шагом 1 Гц. Записанные сигналы передаются на ЭВМ в среду MATLAB для обработки и получения зависимостей АЧХ $A(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$.

МК взаимодействует с компьютером через последовательный интерфейс UART (COM). МК работает в командном режиме, команды формирует среда MATLAB ЭВМ. Команды ЭВМ определяют текущую частоту входного воздействия и начало цикла измерения.

Процесс получения частотных характеристик выполняется в 2 этапа: эксперимент и обработка. Оба этапа выполняются в среде MATLAB ЭВМ.

Эксперимент. Для каждой частоты из исследуемого диапазона микроконтроллеру передаются команды формирования, записи и передачи сигнала. Таким образом, на первом этапе ЭВМ накапливает реакции объекта на синусоидальный сигнал. Пример полученного сигнала приведен на рис. 2.

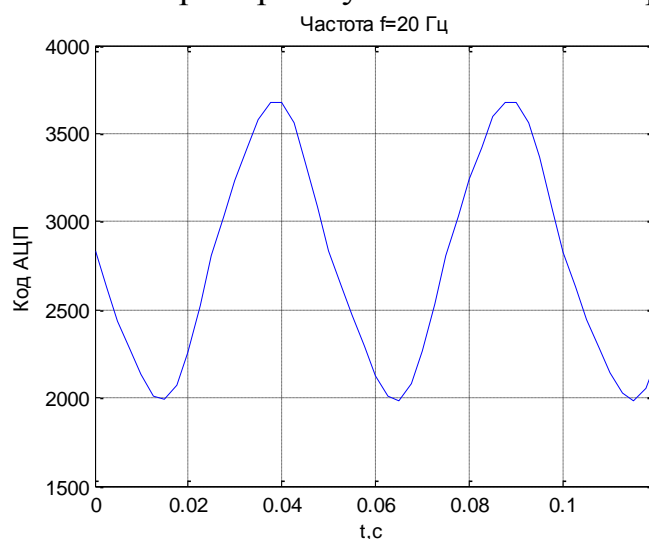


Рис. 2. Выходной сигнал на частоте 20 Гц

Обработка. На этапе обработки к сигналам применяются преобразовательные операции, включающие приведение величины кода АЦП к величине ускорения и вычитания постоянной составляющей. После этого для сигналов каждой частоты определяется значение АЧХ и ФЧХ.

Значение АЧХ определяется как отношение амплитудного значения выходного сигнала к амплитудному значению входного сигнала [2].

ФЧХ определяется как величина временного сдвига между пересечениями уровня $U=0$, приведенная к величине фазы. Иллюстрация определения ФЧХ приведена на рис. 3.

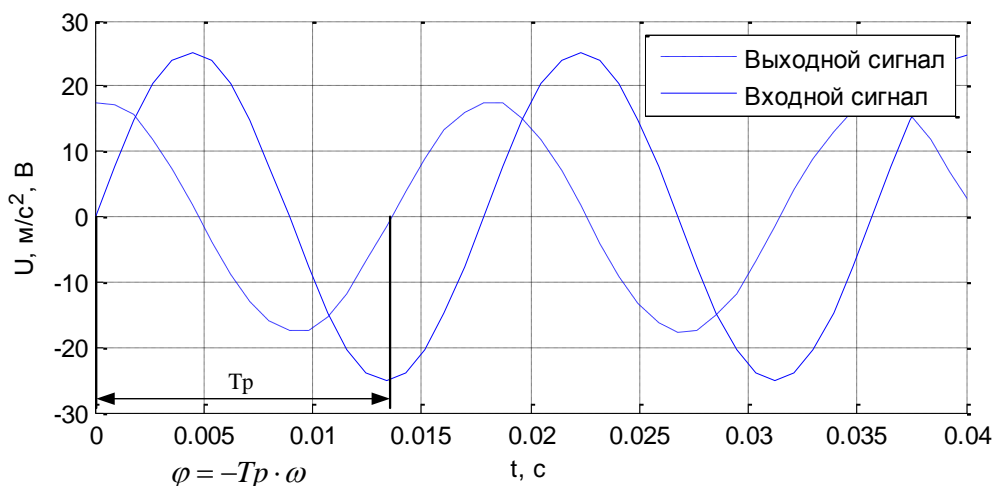


Рис. 3. Пояснение к определению ФЧХ

Результаты экспериментов. На рис. 4-9 приведены полученные частотные характеристики для диапазона частот 5 Гц – 300 Гц.

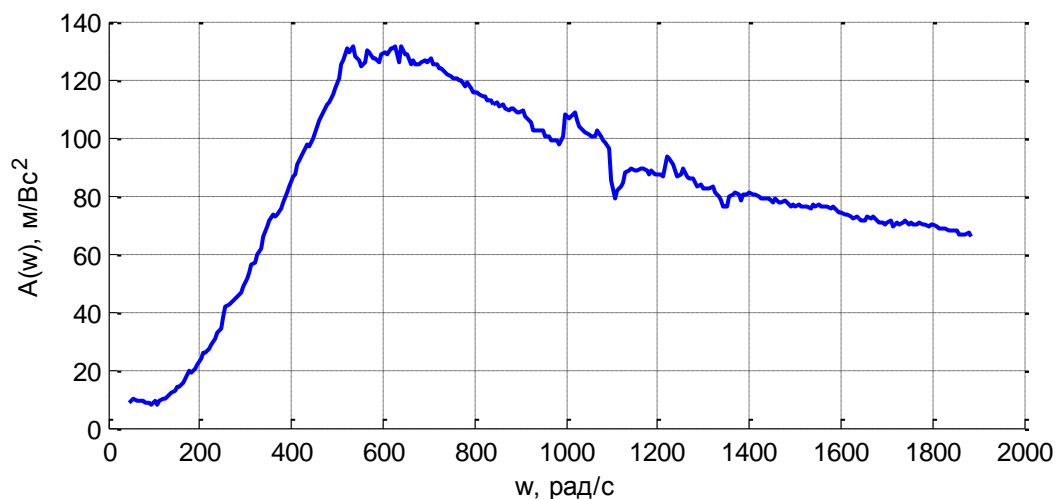


Рис. 4. АЧХ по ускорению

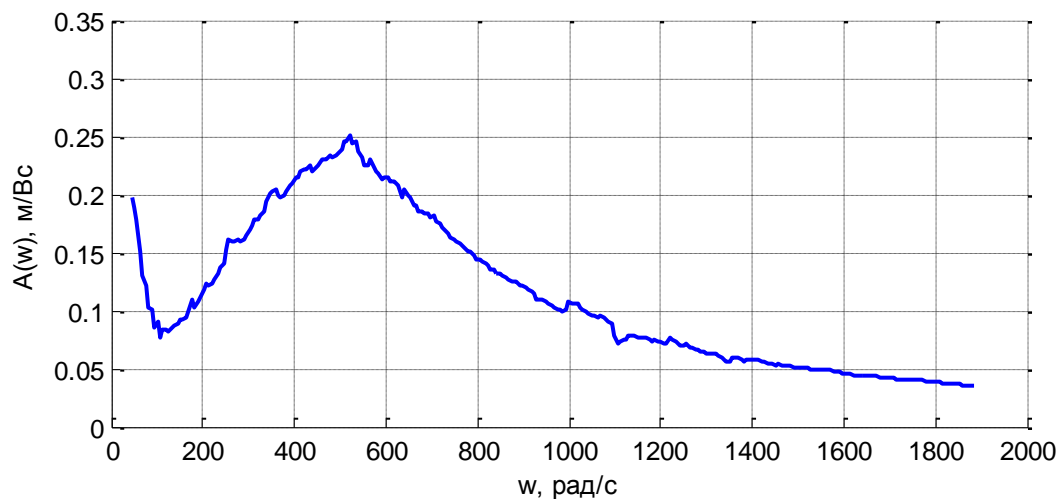


Рис. 5. АЧХ по скорости

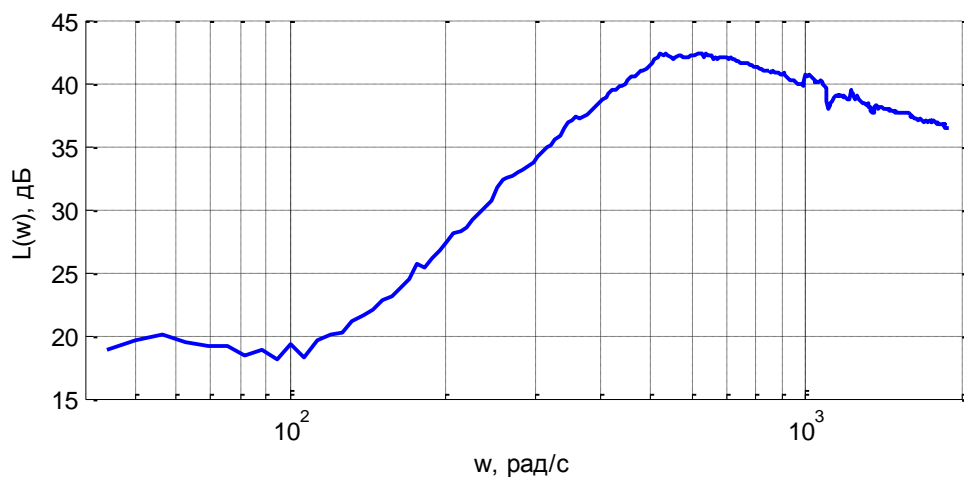


Рис. 6. ЛАЧХ по ускорению

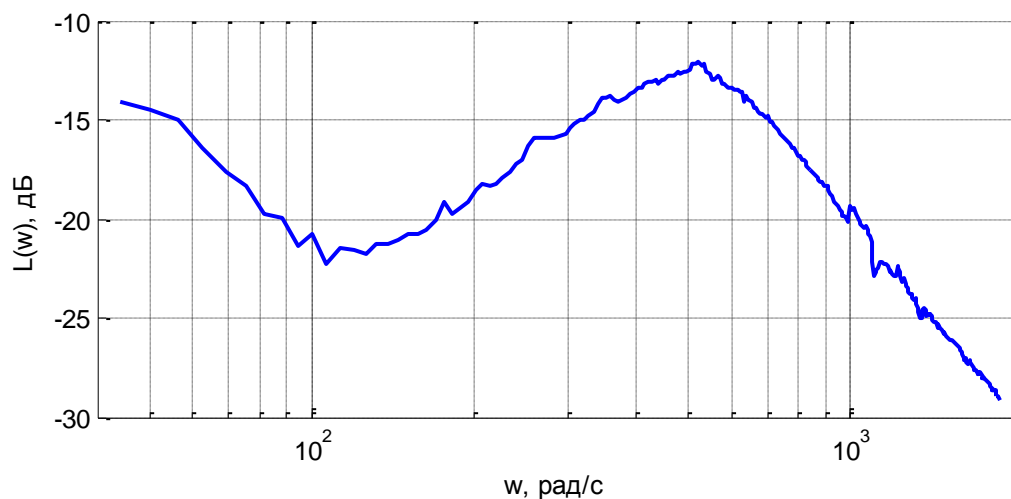


Рис. 7. ЛАЧХ по скорости

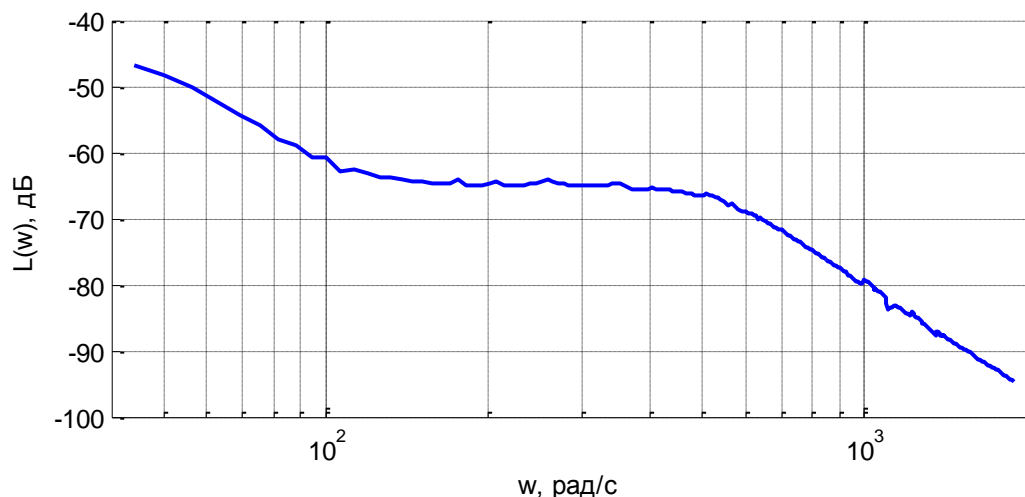


Рис. 8. ЛАЧХ по перемещению

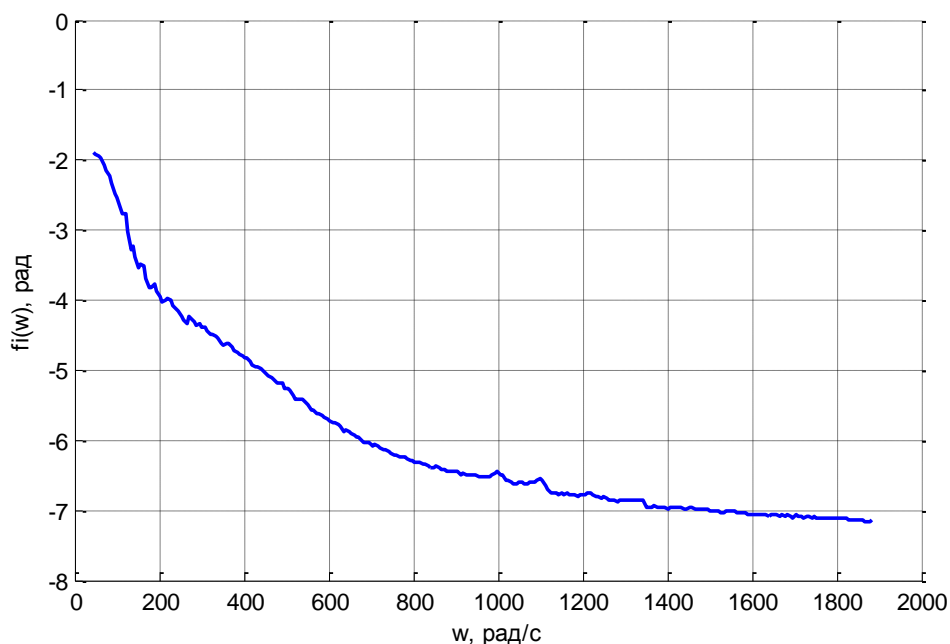


Рис. 9. ФЧХ по ускорению

Полученные логарифмические характеристики позволяют оценить порядок и численные значения постоянных времени передаточной функции виброгенератора. ФЧХ вместе с АЧХ могут быть использованы для определения всех параметров передаточной функции путем минимизации критерия близости искомой и полученных частотных характеристик.

Определение передаточной функции. Для определения структуры воспользуемся ЛАЧХ по перемещению (рис. 8). Примем угол наклона первой ветви -40 дБ/дек, второй 0 дБ/дек, третьей -60 дБ/дек. Исходя из этого, можно определить структуру передаточной функции (ПФ), которая может иметь следующий вид:

$$W(s) = \frac{K(T_1^2 s^2 + 2T_1 \xi_1 s + 1)}{(T_2^2 s^2 + 2T_2 \xi_2 s + 1)(T_3^2 s^2 + 2T_3 \xi_3 s + 1)(T_4 s + 1)},$$

$$T_3 < T_1 < T_2,$$

$$T_3 = T_4.$$

Для получения числовых значений параметров передаточной функции используем критерий близости частотных характеристик искомой ПФ и полученных частотных характеристик в виде

$$J(K_i, T_i, \xi_i) = \int_{\omega_0}^{\omega_1} [A_{\text{эксн}}(\omega) - A_{\text{теор}}(\omega, K_i, T_i, \xi_i)] d\omega + \alpha \int_{\omega_0}^{\omega_1} [\varphi_{\text{эксн}}(\omega) - \varphi_{\text{теор}}(\omega, K_i, T_i, \xi_i)] d\omega,$$

$$J(K_i, T_i, \xi_i) \rightarrow \min_{K_i, T_i, \xi_i},$$

где α – весовой коэффициент.

При минимизации указанной целевой функции используется функция MATLAB `fminsearch(fun, x0)`.

Данная функция имеет два входных параметра:

- минимизируемая функция `fun`;
- начальная точка поиска `x0`.

Указанный выше критерий может быть многоэкстремальным, поэтому для его минимизации нужно использовать метод поиска глобального экстремума. В качестве начальных значений постоянных времени следует использовать величины, обратные частотам излома на ЛАЧХ.

В результате минимизации указанного критерия получены следующие значения параметров передаточной функции

$$K = 4,43 \cdot 10^{-6}, \quad T_2 = 0,0215, \quad T_3 = 0,0019,$$

$$T_1 = 0,2369, \quad \xi_2 = 0,1319, \quad \xi_3 = 0,5239.$$

$$\xi_1 = 11,2642, \quad T_4 = 0,0011,$$

На рис. 10-11 приведены теоретические и экспериментальные частотные характеристики.

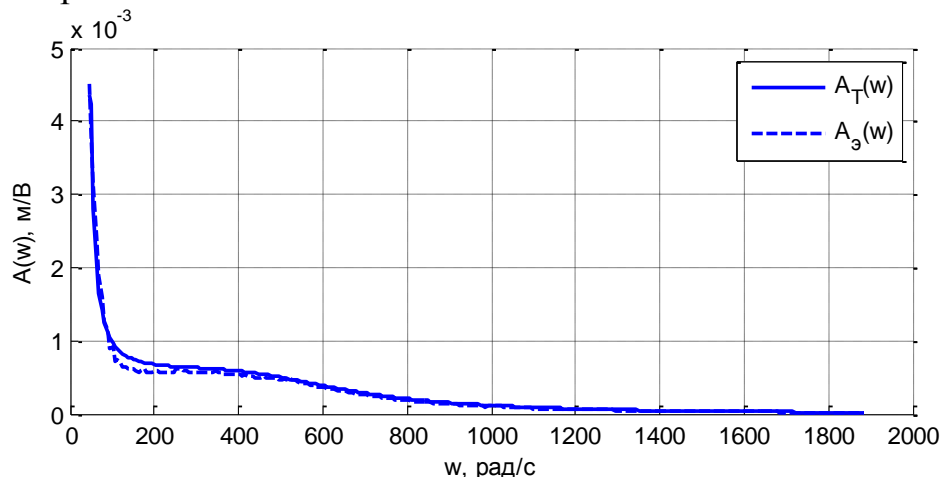


Рис. 10. Сравнение теоретической и экспериментальной АЧХ

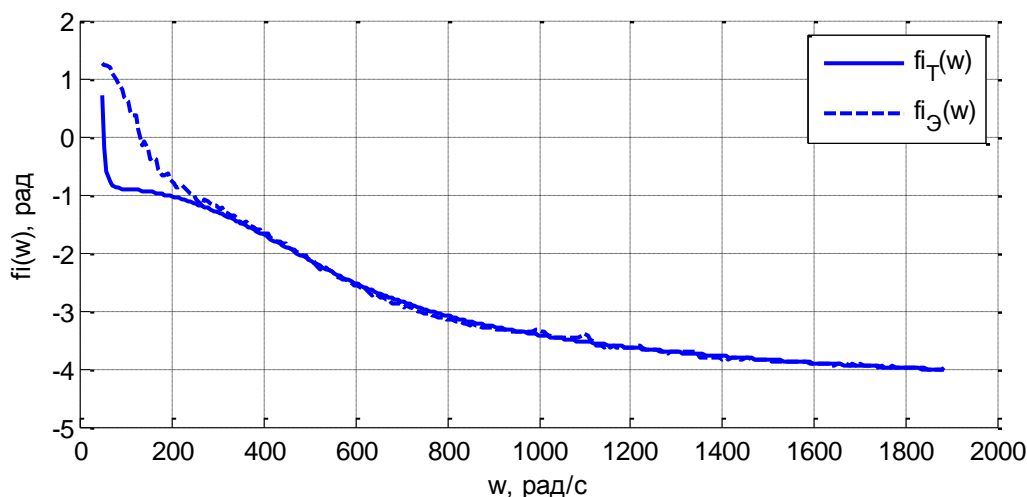


Рис. 11. Сравнение теоретической и экспериментальной ФЧХ

Результат. Получена модель, хорошо описывающая реальный объект в высокочастотной области.

Заключение. По сравнению с “ручным” получением частотных характеристик, использование аппаратно-программного комплекса позволяет более точно провести измерения и получить искомые характеристики объекта исследования. Подход может быть успешно применен для идентификации других объектов.

Список литературы

[1] Распопов В.Я. Микромеханические приборы [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Распопов В.Я.– Электрон. текстовые данные. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/5155>. – (дата обращения 29.03.2016).

[2] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления [Электронный ресурс]: монография/ Жмудь В.А.– Электрон. текстовые данные. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. – 336 с.– URL: <http://www.iprbookshop.ru/45404.html>. – ЭБС «IPRbooks» (дата обращения 27.03.2017)

Аксенов Никита Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: n.aksenov2015@yandex.ru

Корнюшин Юрий Петрович – д-р техн. наук, зав. каф. "Системы автоматического управления" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru

Д.Е. Потапов, Мью Паинг Сат, А.М. Макаренков

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ GRID

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Сложность современных систем автоматического управления и повышение предъявляемых к ним требований ведут к усложнению математических моделей, лежащих в основе всех процедур конструирования таких систем. Эти модели с одной стороны должны учитывать множество возмущающих факторов, в том числе возможность случайных изменений параметров системы, а с другой – обеспечивать возможность эффективной вычислительной реализации. Такие требования к модели являются в известной степени противоречивыми, но в последнее время получают распространение проекционные методы построения моделей сложных систем управления [1], в том числе стохастических [2], которые отличает вычислительная направленность в сочетании с операторной формой представления решений.

В предлагаемой статье рассматривается проблема повышения эффективности алгоритмов моделирования стохастических систем, построенных на основе проекционных методов, за счет использования возможности параллельных вычислений с целью сокращения времени моделирования. Актуальность этой проблемы обусловлена тем фактом, что многие процедуры, выполняемые конструктором при разработке систем управления (синтез регуляторов, синтез оптимальных управлений, идентификация и т.п.), основаны на применении тех или иных методов оптимизации, требующих многократного обращения к процедуре моделирования системы, сокращение времени выполнения которой ведет в конечном итоге к ускорению всего процесса разработки и повышению его качества за счет возможности анализа большего числа конструкторских решений.

Сегодня наряду с симметричными мультипроцессорами и кластерами получили распространение так называемые Grid-системы, которые строятся на базе обычных локальных сетей и используют вычислительные мощности их сетевых компьютеров [3]. Выбор Grid-систем в качестве вычислительной платформы для реализации алгоритмов проекционных методов представляется привлекательным, однако он накладывает определенные ограничения. В частности, здесь не может быть в полной мере реализован внутренний параллелизм, присущий элементарным матричным операциям, поскольку это требует достаточно быстрой передачи данных между процессорами, принципиально недостижимой в локальной сети.

Особенностью применяемого метода моделирования стохастических систем, основанного на использовании усредненных проекционных моделей [2], является представление решений в виде матричных рядов, члены

которых могут быть вычислены независимо друг от друга. Особенность предлагаемого алгоритма параллельных вычислений состоит в разбиении большого массива обрабатываемых данных, содержащего N элементов, на M массивов меньшей размерности и параллельной обработке этих массивов на отдельных машинах сети.

Общий алгоритм обработки данных принимает вид:

- 1) получение исходных массивов данных размером N – элементов;
- 2) разбиение исходных массивов на M – частей, в зависимости от доступных компьютеров в вычислительном кластере;
- 3) создание заданий для свободных программ-исполнителей (“работников” в терминах используемой среды поддержки параллельных вычислений системы MATLAB)
- 4) отправка и последующая параллельная обработка заданий;
- 5) возврат результатов обработки на главную машину;
- 6) восстановление исходных массивов данных размером N из M обработанных частей.

В качестве исходных массивов рассматриваются матрицы, обозначаемые далее как NS6 и NS7.

Вычислительные эксперименты показали заметную эффективность предлагаемого подхода. Например, время решения задачи статистического анализа стохастической системы с переменными случайными параметрами, описываемой моделью в виде дифференциального уравнения второго порядка, без параллельных вычислений составило 523 с. В то же самое время реализация параллельного алгоритма на одной машине с двумя ядрами потребовала почти вдвое меньшего времени – 282 с. (см. рис. 1).

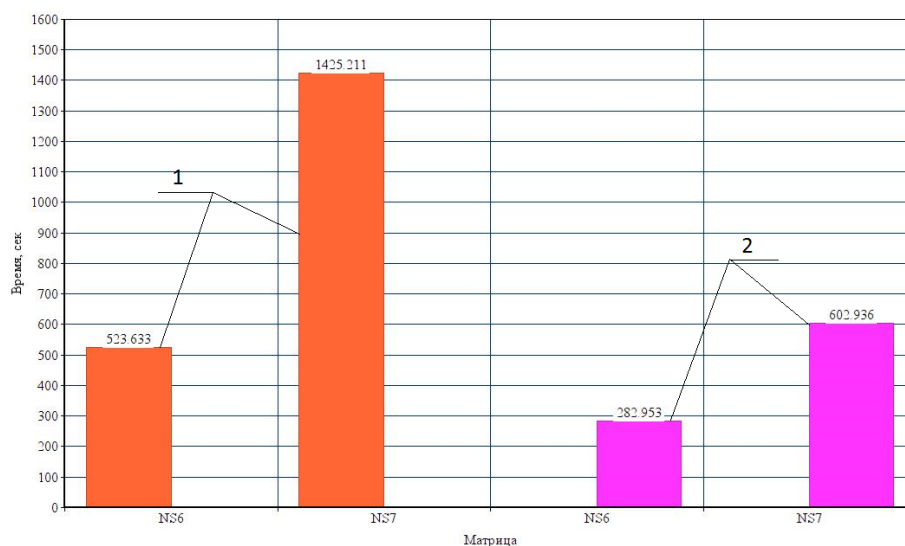


Рис. 1. Диаграмма зависимости времени, затраченного на обработку массива данных, от используемого алгоритма на компьютере с двухъядерным процессором, где 1 – без распараллеливания; 2 – с распараллеливанием

Увеличение числа машин в Grid-сети показало еще больший прирост производительности, что видно из диаграмм, представленных на рис. 2 и рис. 3.

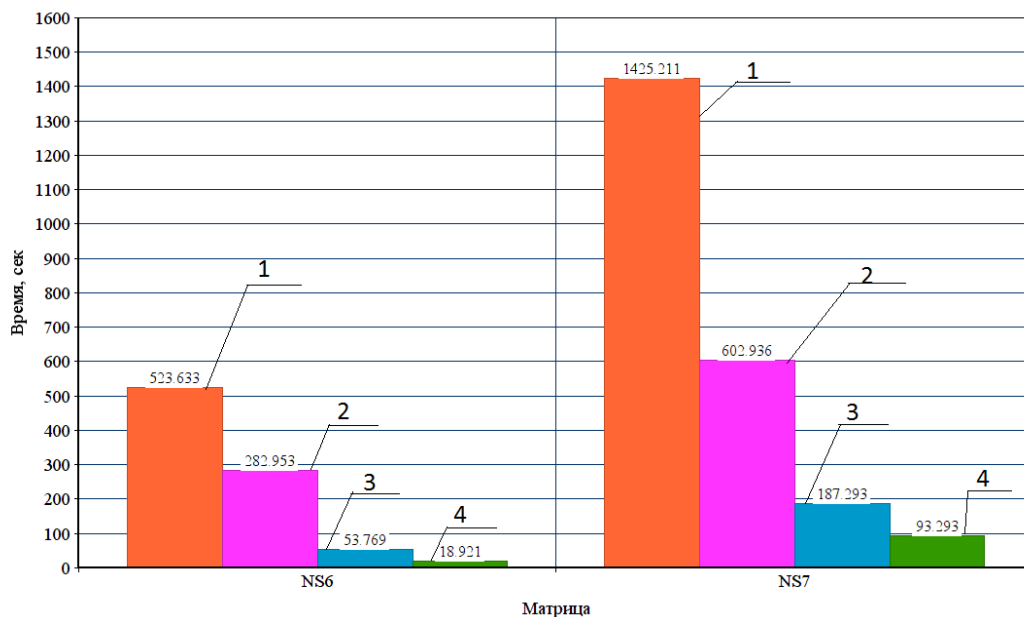


Рис. 2. Зависимость времени, затраченного на обработку данных, от числа доступных “работников” (до 5 машин), где 1 – одна машина без распараллеливания; 2 – одна машина с распараллеливанием; 3 – две машины с распараллеливанием; 4 – пять машин с распараллеливанием

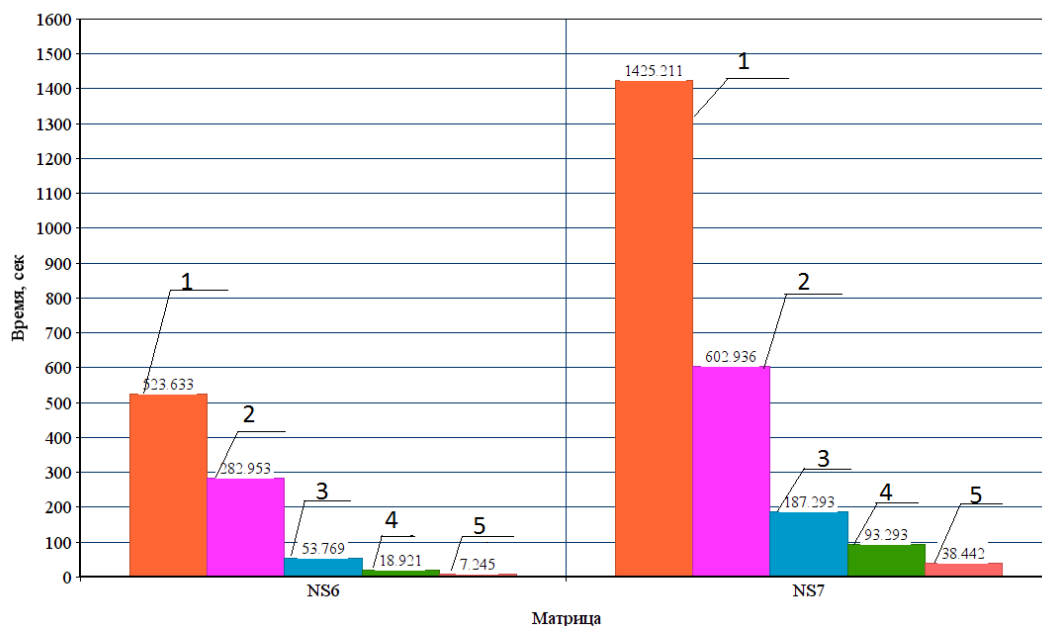


Рис. 3. Зависимость времени, затраченного на обработку данных от числа доступных “работников” (до 10 машин), где 1 – одна машина без распараллеливания; 2 – одна машина с распараллеливанием; 3 – две машины с распараллеливанием; 4 – пять машин с распараллеливанием, 5 – десять машин с распараллеливанием

По результатам проведенных экспериментов видно, что с увеличением количества компьютеров, а также “работников” на каждом компьютере, существенно возрастает производительность. Однако есть определенный предел эффективному увеличению производительности, обусловленный ростом накладных расходов, зависящих, в частности, от таких факторов как размерность массива обрабатываемых данных, задержки в сети, вычислительная мощность компьютеров Grid-кластера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант № 16-41-400701).

Список литературы

[1] Лапин С.В., Егупов Н.Д. Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. 496 с.

[2] Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. М.: Физматлит, 2003. 400 с.

[3] Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

Потапов Денис Евгеньевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Uzeqion@gmail.com

Мьо Паинг Сат – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: myoraingsatt85@gmail.com

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

А.М. Макаренков, Д.В. Филиппов, А.А. Якушев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ УСРЕДНЕННЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Часто при решении задач теории управления, таких как: синтез регуляторов, идентификация, фильтрация и другие, для систем управления, применяемым в таких областях техники и технологий, как авиация, ракетостроение, робототехника, транспортное машиностроение и энергетика на первых этапах применяются линейный или линеаризованные математические модели. При этом, однако, встает вопрос об адекватности полученных моделей реальным объектам, так как в составе конкретных систем из указанных выше областей могут находиться такие нелинейные элементы, которые невозможно в известной степени удовлетворительно описать с помощью линеаризованных выражений.

Целью настоящей работы является решение задач идентификации и оптимизации параметров регулятора для нелинейной стохастической модели ЭГСП, или расширение результатов работы [1] на класс нелинейных систем. В рамках данной работы изучалось влияние нелинейности расходно-перепадной характеристики «сопло-заслонка» математической модели ЭГСП, которое описывается выражением (1).

$$Q_3^{nl} = k_3 \sqrt{0.5 |p_n - p_c - p(t) \operatorname{sign}(x(t))|} \cdot \operatorname{sign}\{p_n - p_c - p(t) \operatorname{sign}(x(t))\} \quad (1)$$

Была выдвинута теория, что нелинейность (1) при рассматриваемых параметрах $p_n = 20 \cdot 10^6 \frac{H}{M^2}$; $p_c = 0$; $k_3 = 0.00135$ не может оказать существенного влияния на результаты решения задач идентификации и оптимизации параметров регулятора, так как при данных параметрах расходно-перепадная характеристика в рабочем диапазоне близка к линейной, что видно на рис. 1.

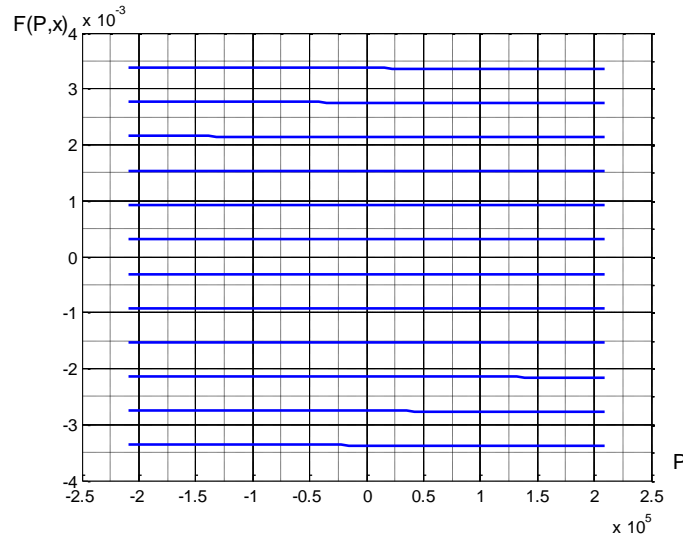


Рис. 1. Расходно-перепадная характеристика в рабочем диапазоне

Задача идентификации случайных параметров формулируется следующим образом. Для стохастической системы с одним случайным параметром K , математическая модель которой описывается дифференциальным уравнением с нелинейностью (1), требуется найти параметры стандартных корреляционных функций случайного параметра K . При этом предполагается, что данный параметр имеет нормальный закон распределения плотности вероятности и его функция его математического ожидания является известной. Также предполагается наличие жесткой (функциональной) статистической связи между коэффициентами дифференциального уравнения и случайным параметром K .

Рассматриваемый метод идентификации основан на минимизации критерия, зависящего от параметров модели. В качестве такого критерия выбрана мера близости корреляционных функций и функций математического ожидания измеренного выходного сигнала реальной системы и тех же статистических характеристик, вычисленных по ее параметризованной модели, который с использованием проекционной аппроксимации модели (1) можно представить в следующей форме:

$$J(D_K) = \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p [c_{ij}^{\varepsilon_m}(D_K)]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p [c_{ij}^{\varepsilon_R}(D_K)]^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon_m}(D_K)$ и $c_{ij}^{\varepsilon_R}(D_K)$ – элементы квадратных матриц проекционных характеристик $C^{\varepsilon_m}(D_K)$ и $C^{\varepsilon_R}(D_K)$ соответственно, вычисляемых как

$$C^{\varepsilon_m}(D_K) = C^{m^u} (C^{m^u})^T - C^{m^p}(D_K) (C^{m^p}(D_K))^T,$$

$$C^{\varepsilon_R}(D_K) = C^{R^u} - C^{R^p}(D_K),$$

где – проекционная характеристика функции математического ожидания измеренного выходного сигнала системы ; – расчетная проекционная ха-

рактическая характеристика математического ожидания выходного сигнала системы, вычисленная по ее усредненной проекционной модели для некоторых параметров корреляционной параметра ; – проекционная характеристика автокорреляционной функции измеренного выходного сигнала системы $R_{xx}^u(t_1, t_2)$; $C^{R_{xx}^p}(D_K)$ – расчетная проекционная характеристика автокорреляционной функции выходного сигнала системы, вычисленная по ее усредненной проекционной модели для некоторых параметров корреляционной параметра. Предложенный метод был применен для идентификации параметров $D_{K_{oc}}$, b корреляционной функции коэффициента усиления цепи обратной связи (3), функция математического ожидания данного параметра при этом считалась известной.

$$m_{k_{oc}}(t) = 0.1(t) = const; R_{k_{oc}k_{oc}}(t_1, t_2) = D_{k_{oc}} e^{-b|t_1 - t_2|} = 5 \cdot 10^{-4} e^{-|t_1 - t_2|}. \quad (3)$$

Результаты решения задачи идентификации с использованием предложенного метода при различном числе количестве экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты решения задачи идентификации

Количество экспериментов	Идентиф. значение $D_{k_{oc}}$	Относительная погрешность $\varepsilon_D, \%$	Идентиф. значение b	Относительная погрешность $\varepsilon_b, \%$
5 000	$4.431 \cdot 10^{-4}$	11.38	1.1244	12.44
10 000	$4.6435 \cdot 10^{-4}$	7.13	0.9072	9.28
20 000	0.0005	0	0.9123	8.7

Задача оптимизации параметров PID-регулятора Задача оптимизации параметров PID-регулятора формулируется следующим образом. Требуется определить значения параметров k_p , k_i , k_d , обеспечивающие заданные динамические характеристики системы управления при условии, что некоторые физические параметры ЭГСП являются нелинейными. Предлагаемый алгоритм включает два этапа оптимизации.

Алгоритм оптимизации параметров регуляторов. Оптимальные значения параметров регуляторов предлагается искать в два этапа. На первом этапе решается задача определения значений параметров регулятора для эквивалентной детерминированной системы. Данная задача может решаться любым из известных методов параметрического синтеза регуляторов детерминированных систем. Например, известен проекционный метод синтеза регуляторов, основанный на минимизации функционала, построенного с использованием проекционной модели системы. Данный функционал имеет следующий вид:

$$J_1(\mathbf{p}) = \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right]^T \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right], \quad (4)$$

где \mathbf{C}^{x_3} – проекционная характеристика эталонного переходного процесса $x_3(t)$; $\mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p})$ – расчетная проекционная характеристика переходного процесса $x_p(t, \mathbf{p}) = \bar{x}(t)$, вычисленная по проекционной модели эквивалентной детерминированной системы для некоторых значений параметров регулятора (элементов вектора \mathbf{p}); T – знак транспонирования.

Значения параметров регулятора определяются в результате минимизации функционала (4), то есть вектор параметров регулятора эквивалентной детерминированной системы определяется как

$$\bar{\mathbf{p}} = \underset{\mathbf{p} \in \mathbb{R}}{\operatorname{arg\,min}} J_1(\mathbf{p}).$$

На втором этапе выполняется повторная оптимизация параметров регулятора с учетом влияния нелинейности параметров системы путем минимизации функционала, выражающего меру отличия проекционных характеристик математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы $x(t)$ от тех же проекционных характеристик выходного сигнала $\bar{x}(t)$ эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$, найденными на первом этапе. Данный функционал имеет следующий вид:

$$J_2(\mathbf{p}) = \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ – элементы квадратных матриц $\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$, определяемых, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \left[\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \right]^T - \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \left(\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \right)^T, \quad \mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$; $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$.

Таблица 2. Результаты оптимизации

Параметры регулятора	Этап 1	Этап 2
k_p	21,3623	13.1378
k_i	0,08688	0.056904
k_d	0,4357	0.079254

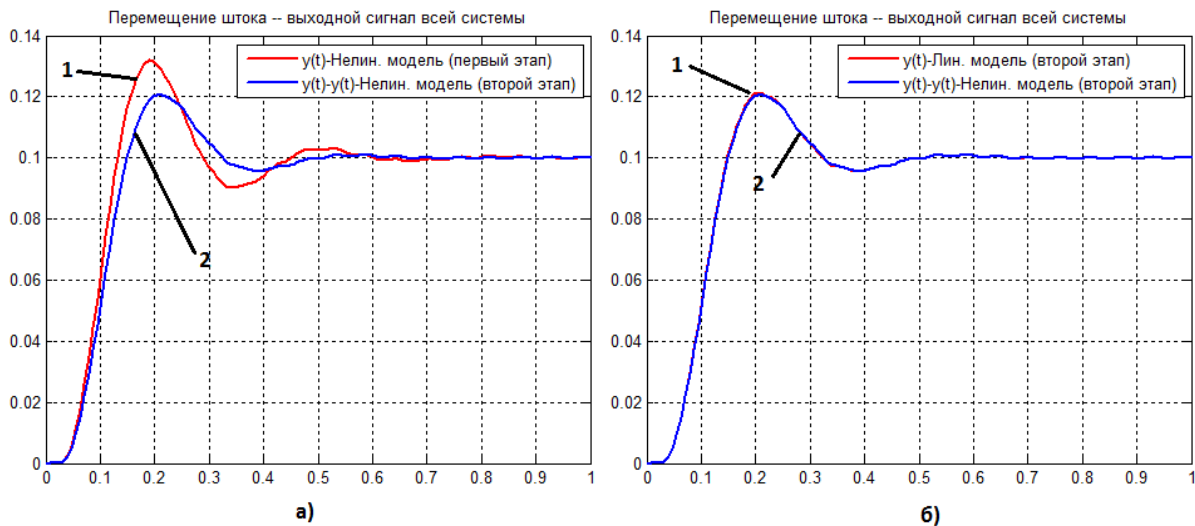


Рис. 2. Результаты оптимизации:

- а) 1 – выходной сигнал нелинейной модели ЭГСП для найденных параметров PID-регулятора этап 1, 2 – выходной сигнал нелинейной модели ЭГСП для оптимизированных параметров PID-регулятора этап 2.
- б) 1 – выходной сигнал линейной модели ЭГСП для оптимизированных параметров PID-регулятора этап 2, 2 – выходной сигнал нелинейной модели ЭГСП для оптимизированных параметров PID-регулятора этап 2

Таким образом предложенный метод усредненных проекционных моделей показал свою эффективность при решении задач синтеза и идентификации стохастических систем, как с точки зрения полученных решений, так и с точки зрения своей вычислительной эффективности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант № 16-41-400701).

Список литературы

- [1] Опыт применения усредненных проекционных моделей для решения задач идентификации и синтеза стохастических систем /Макаренков А.М., Филиппов Д.В., Якушев А.А.// Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗЕ – 2016 г. – №2. – С.8–12.

[2] Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.

[3] Тин Эй Чжо, Макаренков А.М., Тун Тун Чжо, Широкова З.Г. Оптимизация параметров регуляторов стохастических систем

Макаренков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

Филиппов Дмитрий Валерьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gnr0exe@gmail.com

Якушев Анатолий Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yakushevaa40@gmail.com

Чжо Чжо Мин, Д.А. Акименко

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭГСП С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) нашел широкое применение в качестве исполнительного устройства в различных системах в силу ряда преимуществ по сравнению с другими приводами. Для усиления достоинств ЭГСП при проектировании систем управления, в состав которых входит привод, необходимо получение адекватной математической модели привода. В частности, возникает необходимость уточнения числовых значений некоторых параметров имеющейся модели привода на основе экспериментальных исследований. Данную задачу можно свести к задаче поиска минимума функционала

$$J(P) = \left[\int_0^T (y_p(t, P) - y_{эксн}(t))^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $y_{эксн}(t)$ - перемещение штока, полученное экспериментальным путем; $y_p(t, P)$ - выходная координата математической модели привода, которая зависит от множества параметров P , представленной системой уравнений

$$\begin{cases} L_{oy} \frac{d}{dt} i(t) + (R_{oy} + R_{вых}) i(t) = K_u (K_{эу}(u(t) - K_{oc} y(t)) - r_{oc} i(t)) - \frac{c_{эмн}}{l_{эмн}} \frac{d}{dt} h(t); \\ m_я \frac{d^2}{dt^2} h(t) + K_{эм}^я \frac{d}{dt} h(t) + (C_я + K_h) h(t) = K_{\Phi i} i(t) - K_p p_y(t); \\ \frac{V_y}{2E} \frac{d}{dt} p_y(t) + K_{qp} p_y(t) = K_{qh} h(t) - A_3 \frac{d}{dt} x(t); \\ m_3 \frac{d^2}{dt^2} x(t) + K_{эм}^3 \frac{d}{dt} x(t) + (C_3 + C_{з\partial}) x(t) = A_3 p_y(t); \\ \frac{V_0}{2E} \frac{d}{dt} p(t) = K_3 x(t) \sqrt{\frac{1}{2} (p_{num} - p(t) \cdot \text{sign}(x))} - A_{2y} \frac{d}{dt} y(t); \\ m_{2y} \frac{d^2}{dt^2} y(t) + K_{эм}^{2y} \frac{d}{dt} y(t) + C_{2y} y(t) = A_{2y} p(t). \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что часть параметров модели (2), к которым можно отнести параметры рабочей жидкости, коэффициенты трения, настраиваемые параметры усилителей, параметры местных обратных связей и т.п., невозможно точно определить и обычно их числовые значения определяются на

основе эксплуатации аналогичных приводов или являются справочными и число таких параметров достаточно велико.

Минимум функционала (1) можно найти, воспользовавшись двумя подходами. Первый подход основан на использовании поисковых алгоритмов. Однако поисковые методы имеют недостаток, который заключается в том, что для определения глобального минимума целевой функции на множестве допустимых значений искомых параметров необходимо организовать поиск для различных стартовых значений искомых параметров. Из полученного множества найденных оптимальных значений выбираются те, которые обеспечивают наименьшее значение целевой функции.

Второй подход основан на использовании метода Монте-Карло, идея которого заключается в генерации множеств случайных значений искомых параметров в пределах их допустимых значений и нахождения значения целевой функции для каждой случайной выборки. Данный метод дает возможность нахождения глобального минимума. Однако к его существенному недостатку следует отнести значительные вычислительные затраты, поскольку для получения результата с требуемой точностью необходимо генерировать достаточно большое множества случайных значений искомых параметров.

Как в первом, так и во втором случае затраты по времени на решение поставленной задачи можно снизить, используя параллельные вычисления. Для первого подхода можно организовать параллельную реализацию поискового алгоритма для различных начальных значений искомых параметров. Во втором – организовать параллельное вычисление целевой функции для выборок случайных значений искомых параметров.

Ниже представлены результаты идентификации параметров математической модели электрогидравлического следящего привода с использованием обоих подходов. Модель привода после соответствующих обоснованных упрощений удалось свести к системе уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} m_3 \frac{d^2}{dt^2} x(t) + (K_3^{em} + K_{moc} K_{эмн} A_3) \frac{d}{dt} x(t) + (C_3 + K_h) x(t) = \\ \hspace{15em} = K_{эу} K_{эмн} A_3 (u(t) - K_{oc} y(t)); \\ \frac{V}{2E} \frac{d}{dt} p(t) = K_3 x(t) \sqrt{\frac{1}{2} (p_{num} - p(t) \text{sign}(x))} - A_{эу} \frac{d}{dt} y(t); \\ m_{эу} \frac{d^2}{dt^2} y(t) + K_{эу}^{em} \frac{d}{dt} y(t) + C_{эу} y(t) = A_{эу} p(t), \end{array} \right.$$

где

$$K_{эмн} = \frac{K_u K_{\Phi i} K_{qh}}{(R_{oy} + R_{вых} + K_u r_{oc}) (K_{qp} (C_я + K_h) + K_{qh} K_p)},$$

$$K_{мос} = \frac{A_3}{K_u K_{\Phi i} K_{qh}} (R_{oy} + R_{вых} + K_u r_{oc}) (C_{я} + K_h).$$

В качестве идентифицируемых параметров рассматривались: характеристики рабочей жидкости, коэффициенты вязкого трения подвижных частей привода, коэффициенты настройки электронного усилителя и датчика обратной связи, коэффициенты линеаризации расходно-перепадной характеристики распределителя типа сопло-заслонка.

При минимизации функционала (1) поисковым алгоритмом в качестве начальных значений выбирались граничные значения уточняемых параметров, а при использовании метода Монте-Карло генерировались 5000 случайных выборок значений уточняемых параметров с равномерным законом распределения на множестве допустимых значений. На рисунке 1 представлен результат уточнения параметров привода. На рисунке 2 представлены зависимости затрат по времени на решение поставленной задачи в зависимости от числа задействованных вычислителей в кластере.

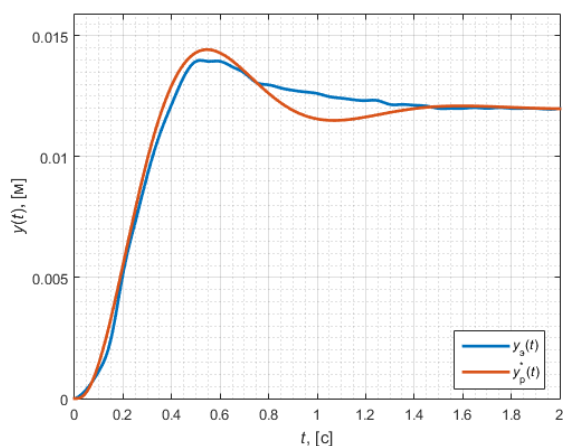
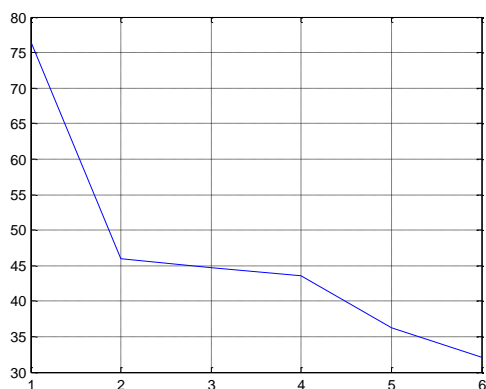
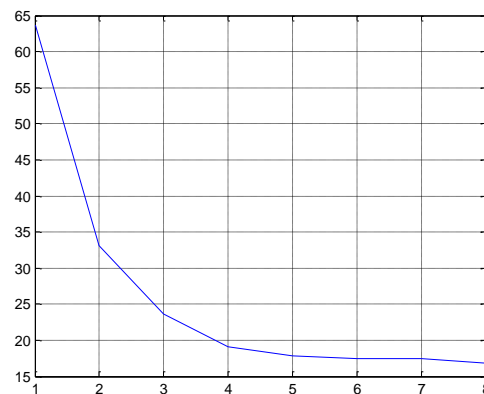


Рис. 1. Графики выходных сигналов, полученных экспериментально и для уточненных значений искомым параметров



а)



б)

Рис. 2. Зависимость затрат по времени (секунды) от числа процессоров: а) метод Монте-Карло; б) условная оптимизации поисковым методом

Таким образом, распараллеливание вычислений в задаче уточнения числовых значений параметров ЭГСП позволяет значительно снизить затраты по времени как с применением поисковых алгоритмов, так и метода Монте-Карло.

Список литературы

[1] Оленев Н.Н., Печкин Р.В., Чернецов А.М. Параллельное программирование в MatLab и его приложения. - М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2007. – 120 с.

[2] Кепнер Дж. Параллельное программирование в среде MATLAB для многоядерных и многоузловых вычислительных машин / Под ред. Д.В. Дуброва; Предисл.: В.А. Садовичий. – М.: Издательство Московского университета, 2013. – 296 с.

[3] Крымов Б.Г. и др. Исполнительные устройства систем управления летательных аппаратов. / Б.Г. Крымов, Л.В. Рабинович, В.Г. Стеблецов. – М.: Машиностроение, 1987 г. – 264 с.

Чжо Чжо Мин – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ryinsicmtz@gmail.com

Акименко Д.А. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru

А.Ш. Абдурахманов, М.О. Корлякова

ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ В ТОЛПЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Задача выделения лица человека в естественной или искусственной обстановке с последующей идентификации всегда находилась в ряду самых приоритетных задач для исследователей, работающих в области систем машинного зрения и искусственного интеллекта.

Цель работы – разработать программное обеспечение для распознавания человека, изображенного в профиль на фотографии, либо на кадре видеопотока, получаемого с камеры.

Поставленная задача достигается путем поэтапной обработки входного изображения. Так на первом этапе проводится детектирование лица в кадре, затем проводится нормализация области. На следующем этапе происходит извлечение ключевых признаков и наконец проводится сопоставление с базой ключевых признаков [1,2].

Так как реализуемый нами проект ориентирован на работу с лицами людей, угол поворота головы которых составляет более 20 градусов, то выбор пал на базы данных с уже размеченными фотографиями. Данное условие сильно упростит этап подготовки вычленения необходимого для работы подмножества выборки.

Под детектированием лиц на изображении будем понимать процесс локализации областей изображения, содержащих лица людей. Границы искомых областей в общей постановке задачи размыты, однако чаще всего подразумевается минимальный описывающий прямоугольник (Minimum Bounding Rectangle, MBR) [3]. В данной работе в качестве искомой области рассматривается минимальный описывающий квадрат, включающий контур лица, лобную часть и подбородок.

В одной из самой известной библиотеки компьютерного зрения OpenCV имеется уже обученный детектор на основе каскадов Хаара, но он обучен на определение только профильных изображений лиц, либо с небольшими углами поворота головы. Таким образом, было выяснено, что существенные отклонения головы наблюдаемого от фронтального положения ведут к неспособности этого детектора определить лицо в кадре.

Было принято решение провести обучение своего детектора, который смог бы обойти этот недостаток. Для обучения детектора использовалась выборка UMD [4]. Данная база изображений предоставляется с информационным файлом, описывающим каждое изображение с точки зрения местонахождения лица в кадре, вида положения головы (фронтальное, повернутое вправо, профильное и т.д.), возрастом и полом человека. Для

обучения использовалось 500 положительных классов и 700 отрицательных классов.

Положительные классы были получены путем выделения областей пикселей с учетом информационного файла. Отрицательные классы были получены с помощью выделения на тех же кадрах областей, которые не входят в прямоугольную область изображения лица.

Примеры положительных и отрицательных классов приведены на рис. 1.

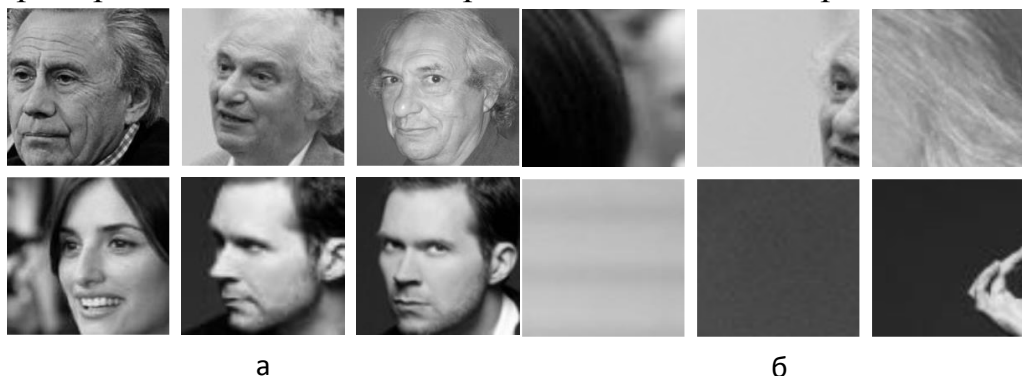


Рис. 1. Примеры положительных (а) и отрицательных (б) классов

Результаты работы детектора представлены на рис. 2.

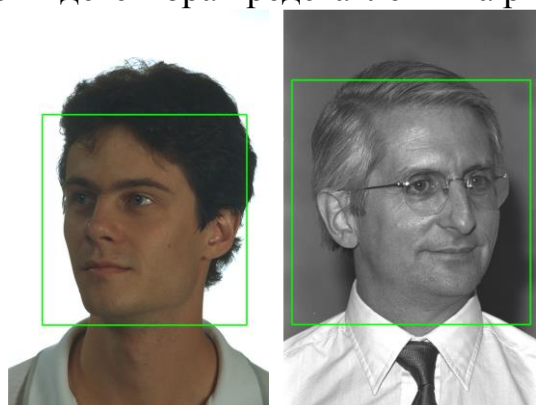


Рис. 2. Результаты работы детектора

Для задачи классификации использовался метод на основе применения сверточных нейронных сетей. Сверточные нейронные сети известны своими обобщающими способностями, позволяющие обучить сеть на выборке одного класса, а применять для классификации данных другого класса [5]. Именно это свойство было решено проверить в настоящей работе.

Используя сверточную нейронную сеть, обученную на фронтальных изображениях лиц людей и новый детектор, была проведена серия тестов по распознаванию людей, изображенных с сильными отклонениями головы от фронтального положения.

Так как детектор был обучен на определение в кадре лица человека, повернутого вправо, было принято решение разделить изображения из базы данных FERET [6] на 2 группы: 1 – изображения лиц, повернутых вправо (2500 изображений, 836 классов); 2 – изображения лиц, повернутых

влево (2816 изображений, 801 класс). Это позволило нам проводить так называемые сплит-тесты.

Для каждой нейронной сети было проведено 4 теста, для вычисления ошибок:

- True Positive Rate (TPR) – верно распознанное изображение человека, имеющегося в базе данных;
- False Positive Rate (FPR) – изображение человека, отсутствующего в базе данных распознано как известное;
- True Negative Rate (TNR) – изображение человека, отсутствующего в базе данных распознано как неизвестное;
- False Negative Rate (FNR). – изображение человека, имеющегося в базе данных принято за другого человека, находящегося в базе;

Проиндексировав первую группу изображений на нейронной сети, проверим качество распознавания на:

- той же самой группе изображений (таблица 1)
- на второй группе изображений (таблица 2)

Таблица 1. Результаты первого теста

True positive rate: 99.12%	False positive rate: 0.00%
False negative rate: 0.88%	True negative rate: 0.00%

Таблица 2. Результаты второго теста

True positive rate: 80.11%	False positive rate: 5.86%
False negative rate: 8.06%	True negative rate: 5.97%

Проиндексировав вторую группу изображений на нейронной сети, проверим качество распознавания на:

- той же самой группе изображений (таблица 3)
- на первой группе изображений (таблица 4).

Таблица 3. Результаты третьего теста

True positive rate: 99.40%	False positive rate: 0.00%
False negative rate: 0.60%	True negative rate: 0.00%

Таблица 4. Результаты четвертого теста

True positive rate: 77.88%	False positive rate: 8.52%
False negative rate: 7.76%	True negative rate: 5.84%

Таким образом, качество распознавания на свободной выборке составило от 83.72% до 86.08%. Среднее время обработки одного изображения: 0.0440 с

Выводы. Предложенный в работе метод детектирования позволяет уверенно обнаруживать большую часть лиц с большим углом отклонения от фронтального положения. Предобработка и нормализация полученных изображений лиц существенно улучшает результаты идентификации и верификации.

Метод классификации также позволяет уверенно классифицировать большинство объектов, для повышения качества классификации можно применить распознавание признаков, полученных из 3d модели лица человека, что повлияет на быстродействие системы.

На данный момент, уделяется особое внимание повышению скорости и точности распознавания, путем применения методов множественного трекинга объектов в видеопотоке и разработки процедур отслеживания областей видеопотока в режиме реального времени.

Список литературы

[1] Пентланд А. Распознавание лиц для интеллектуальных сред. *Открытые системы*, 2000, №3, с. 17-20.

[2] Талбонен А. Н., Рогов А. А. Модели и методы поиска людей на фотографиях из исторического альбома. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*, 2012, № 6, с. 113-117.

[3] Детектирование и распознавание лиц URL: <http://kuznech.com/ru/products/facedetection/> (дата обращения: 26.03.2017)

[4] UMDFaces Dataset URL: <http://umdfaces.io/> (дата обращения: 13.01.2017)

[5] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *NIPS*, 2012, vol. 1, pp. 1106–1114.

[6] Color FERET Database URL: <https://www.nist.gov/itl/iad/image-group/color-feret-database> (дата обращения: 18.01.2017)

Абдурахманов Акмал Шавкатович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: articles.ash@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Хейн Кхант Аунг, М.О. Корлякова

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Многие реальные задачи связаны с аппроксимацией разрозненных объектов-примеров функцией многих переменных. Примером таких задач может служить описание экспериментальных данных для сложных физических и химических процессов. Далеко не всегда такие модели имеют строгое математическое описание и предположение о виде искомой функции. Тогда цель исследования и описания таких данных состоит в построении достаточно надежного описания существующих данных без анализа их природы. Однако, в следствии большого числа экстремальных точек, это потребует построения сложных моделей, вид которых не известен заранее. Таким образом, интерес представляет формирование модели описания некоторого явления, представленного в виде примеров в табличной форме. Рассмотрим процедуру построения такой модели для нейросетевых аппроксиматоров.

Помимо возможности решать широкий класс задач нейросети обладают рядом значительных достоинств [1, 2], которые определяются их архитектурой и способностью к обучению на примерах. Среди главных достоинств нейросетей можно отметить [1]:

- устойчивость к шумам входных данных;
- адаптация к изменениям;
- отказоустойчивость.

Основной недостаток нейронных сетей состоит в необходимости огромного количества примеров для обучения. Однако в контексте задачи аппроксимации функции это не является недостатком, т.к. обычно примеров реализации искомой модели достаточно много. Кроме того, поскольку нет гарантии отсутствия искажений сигнала, то нейронные сети позволяют решать задачу эффективней и быстрее других методов. В качестве основной модели для аппроксимации выберем архитектуру многослойный перцептрон [2], который демонстрируем качества универсального аппроксиматора, т.е. может быть обучен на все, что способен представить.

Пример для оценки возможностей настройки нейросетевого аппроксиматора выберем в форме многоэкстремальной функции Расстригина для 2-х переменных. Функция Растригина – невыпуклая функция, используемая для тестирования эффективности алгоритмов оптимизации, типичный пример нелинейной мультимодальной функции [3]. Нахождение минимума этой функции является достаточно трудной задачей из-за большой области

поиска и большого количества локальных минимумов. Определение функции можно дать в следующем виде:

$$f(x) = Ax + \sum_{i=1}^n [x^2 - A \cos(2\pi x_i)], \quad (1)$$

где $A=10$ и $x_i \in [-5.12, 5.12]$. Глобальный минимум в точке $x=0$, где $f(x)=0$.

Эта функция демонстрирует очень большое число локальных минимумов и максимумов, а кроме этого, при расширении целевого диапазона растет их число и значение (см. рис. 1, а и б). Будем рассматривать настройку нейронной сети на примеры, представленные в следующем виде:

- входы сети – значения аргументов функции Расстригина,
- выходы сети – значения функции.

Изменяемые параметры сети:

- ширина диапазона изменения входов,
- шаг записи примеров (что эквивалентно количеству примеров),
- число нейронов скрытого слоя,
- алгоритм настройки синаптических весов.

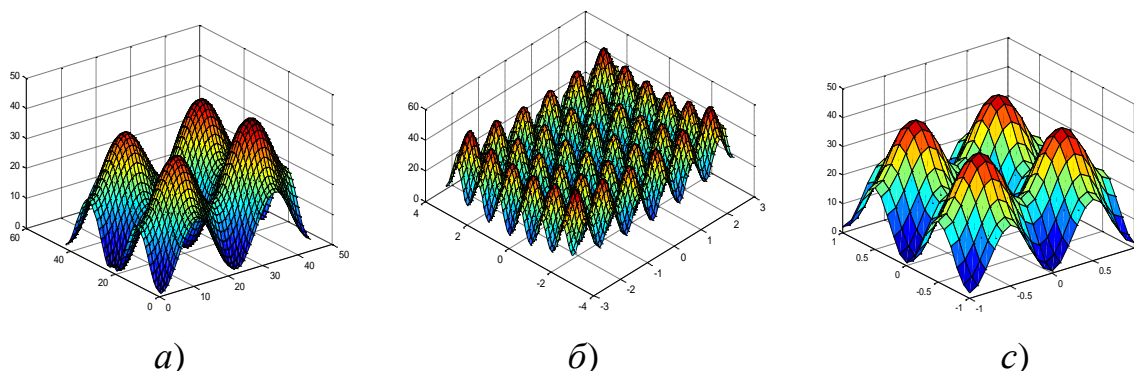


Рис. 1. а) базовая модель, б) увеличили диапазон, с) уменьшили шаг .

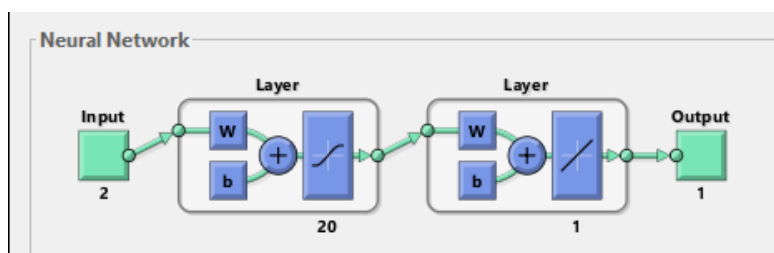


Рис. 2. Модель Сети

Схема обучаемой в среде MatLab нейросети приведена на рисунке 2.

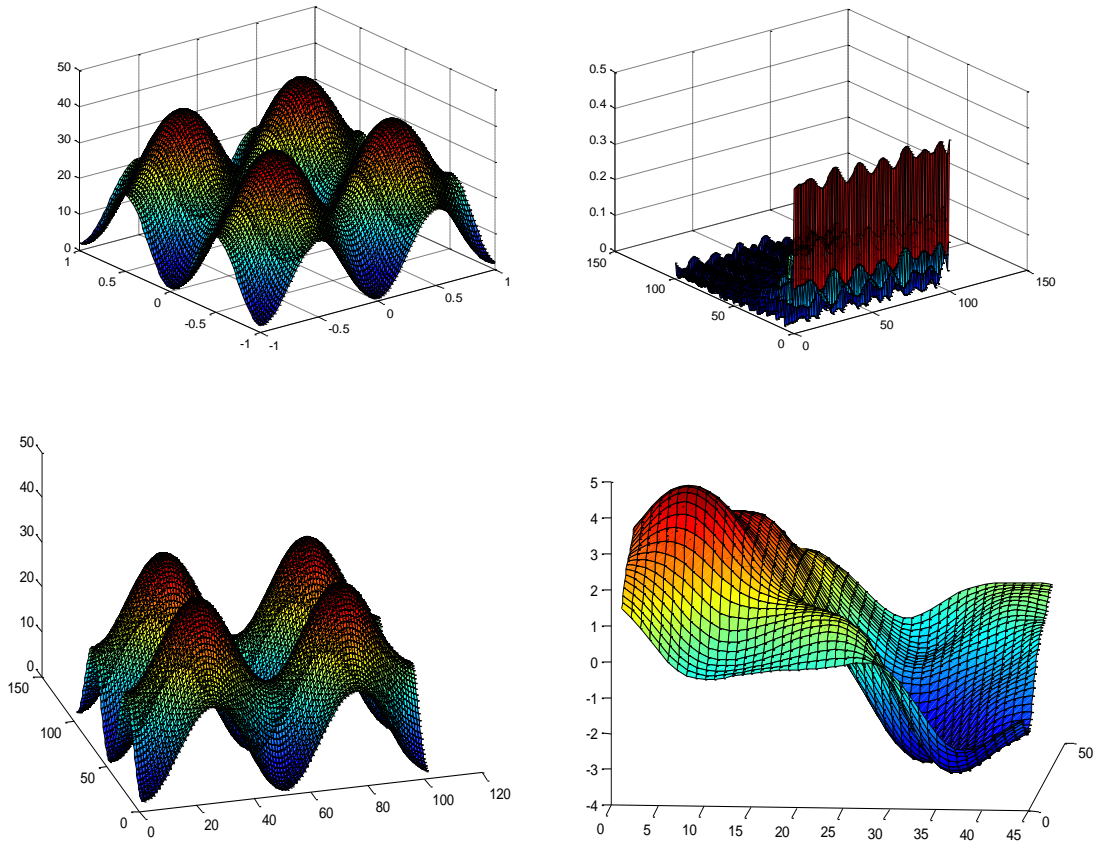


Рис. 3. а) исходная Модель б) ошибка Обучения в) тестовая Модель д) результат Работы Сети

Ошибка работы сети определена как средняя абсолютная ошибка относительно целевого значения функции в виде $E_{train}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} |Y_{net}(X_i) - D(X_i)|$, где, $E_{train}(n)$ - ошибка, $Y_{net}(X_i)$ - выход сети, среагировавшей на входы (X_i) , а, $D(X_i)$ - целевое значение выхода обучаемой модели. Примеры результатов обучения нейросетей в различных конфигурациях приведены в таблице 1.

Таблица 1

Алгоритм настройки весов	Число нейронов	Шаг h	Диапазон входов (-m, m) : m	Ошибка обучения	Ошибка теста
traingd	1	0,1	0,1	1,1070	2,0496
traingd	5	0,1	0,1	1,2486	2,8353
traingd	10	0,1	0,1	1,1662	2,4497
traingd	20	0,1	0,1	0,9307	3,1006
traingd	5	0,02	0,1	0,8765	1,8411
traingd	5	0,1	1	7,7302	20,1638
traingdm	5	0,2	10	36.8617	87.0681
trainscg	10	0,1	0,1	0.2046	1.8073

Использованы алгоритмы изменения настраиваемых параметров сети: Traingd – наискорейший спуск, traingdm – модифицированный алгоритм наискорейшего спуска, **trainscg – сопряженный градиент**.

Из таблицы видно, что наибольшее влияние на результаты оказывает размер области аппроксимации, что подразумевает разделение области аппроксимации на подобласти и обработку их отдельно. Результаты работы с модельным примером были применены для формирования классификатора сигналов магнитных меток, получаемого с антенной системы пропускного устройства. Результаты моделирования позволили определить размер сети (5 нейронов сигмоидного типа) и выбрать алгоритм обучения – trainscg. Опыт настройки сетей будет применен в дальнейшей работе при решении задач аппроксимации и классификации.

Список литературы

- [1] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2006 – М: Вильямс – 1102 с
- [2] Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика, 1992
- [3] **Функция Растригина**. Материал из Википедии – свободной энциклопедии// [электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Функция_Растригина_note-2 (29/03/2017)

Хейн Кхант Аунг – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uuheinkhant@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

А.А. Брынза, М.О. Корлякова

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ЗАВИСИМОСТИ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ГЛАЗ ОТ УГЛА НАКЛОНА ЛИЦА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Распознавание лиц с высокой точностью и быстродействием по методу, который был описан Полом Виолой и Майклом Джонсом, возникает проблема искажения получаемого результата, в следствии невозможности постоянного поддержания горизонтального угла наклона лица пользователя. Небольшое отклонение приводит к ощутимому снижению качества распознавания. Рассмотрим и проверим практическую эффективность различных методов, позволяющих нормировать изображение, делая его пригодным для дальнейшего анализа.

Среди алгоритмов нормирования следует выделить несколько основных групп [1]:

- Методы на основе анализа гистограммы интенсивности изображения,
- Методы сканирующего окна,
- Методы проверки гипотезы о размещении линии симметрии
- Поиск особенностей (глаза, нос) на основе признаков.

Перейдем к подробному анализу примеров работы каждого типа процедур нормализации.

Первый подход к выделению линии симметрии на основе анализа гистограммы интенсивности, является наименее вычислительно затратным. Идея заключается в определении наибольшего уровня контрастности лица пользователя. Из проведенных экспериментов, данное значение в большинстве случаев соответствует области, находящейся на уровне носа пользователя. Пример изображения и его гистограммы приведены на рис.1

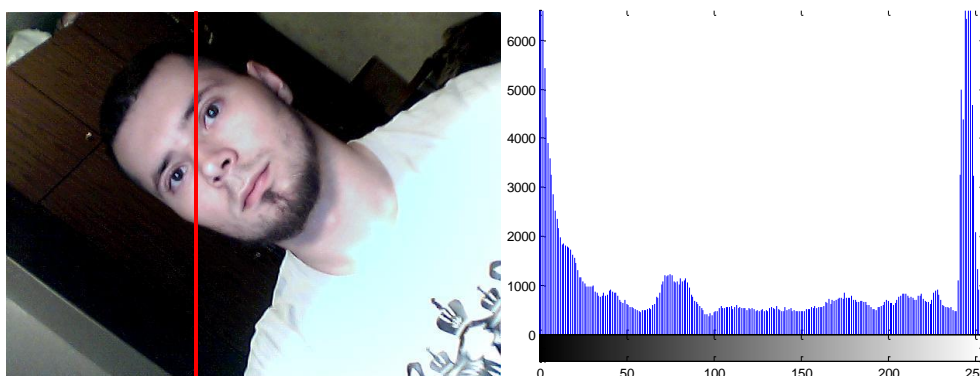


Рис. 1. Тестовое изображение под углом $\sim 60^\circ$ и его гистограмма

Второй подход – выделение линии симметрии, используя сканирующее окно. В основе данного подхода лежит сравнение с эталоном: в процессе поиска линии симметрии на изображении лица, между собой сравниваются две вертикальные полосы, при этом одна полоса - эталон фиксируется, и относительно нее сравниваются другие полосы, сдвигающиеся слева направо. Полученное значение минимума будет соответствовать линии симметрии на лице.

Значение минимума определяется 2 способами: [1]

- Непосредственным сравнением полос между собой в метрике L_2

$$d(x_t) = \|L(x_t) - R(x_t)\| \quad (1)$$

- С использованием гистограммного подхода (рис.2 и рис.3), где также используется метрика L_2 :

$$d(x_t) = \|H^{(L, \text{BIN})}(x_t) - H^{(R, \text{BIN})}(x_t)\| \quad (2)$$

где:

$L(x_t), R(x_t)$ – левая и правая полоса, зафиксированные на шаге x_t

$H^{(L, \text{BIN})}(x_t), H^{(R, \text{BIN})}(x_t)$ – гистограммы с числом интервалов BIN для левой и правой полосы

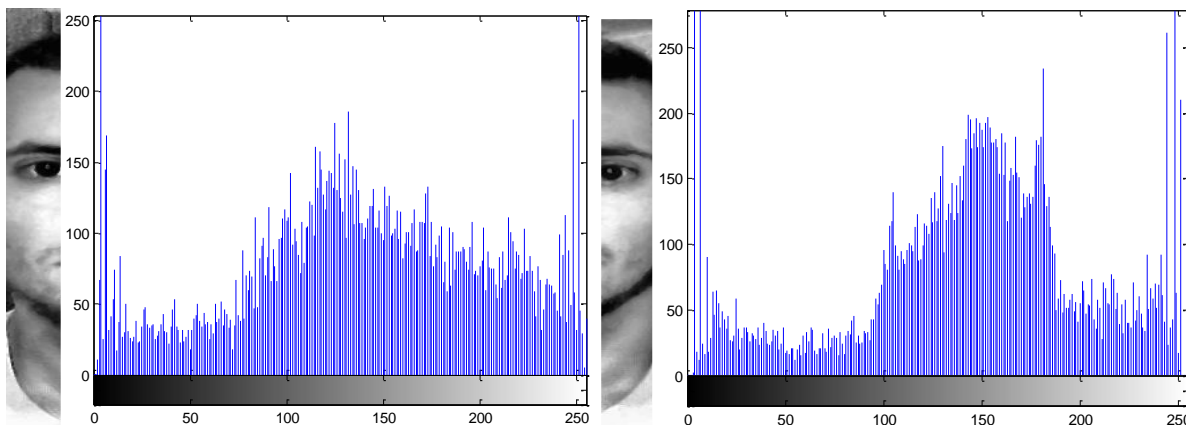


Рис. 2. Анализируемые фрагменты и соответствующие гистограммы

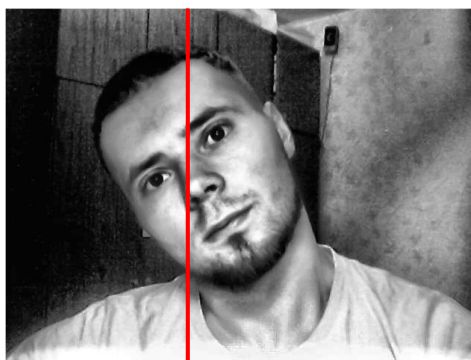


Рис. 3. Результат работы изложенного метода

Следующий метод – определение фрагментов, симметричных относительно потенциальной линии симметрии сканирующего окна. Это предпо-

лагает последовательный перебор вертикальных сканирующих полос, при этом, каждая из выделенных полос разбивается на 2 симметричные области, и производится вычисление значения минимума, которое в итоге будет соответствовать линии симметрии на лице (рис.4, 5).

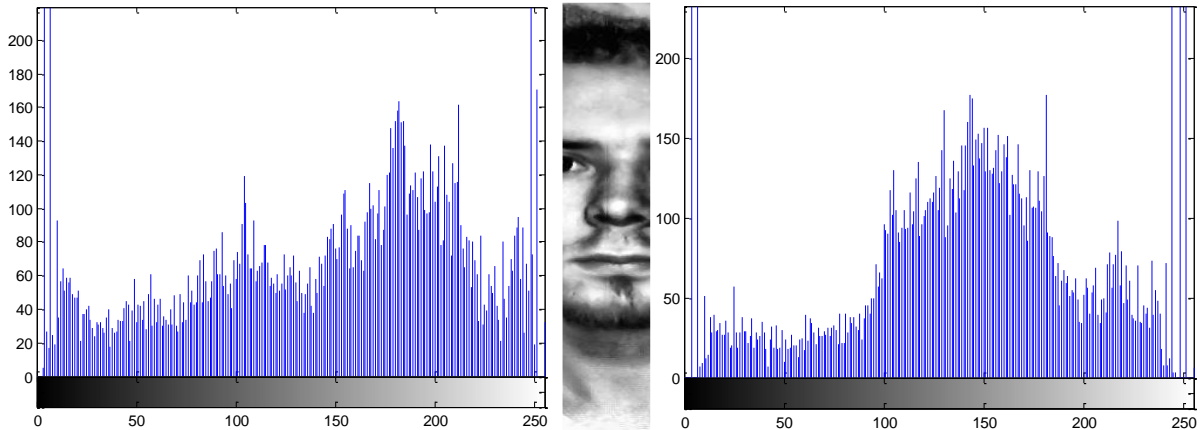


Рис. 4. Анализируемый фрагмент и соответствующие гистограммы

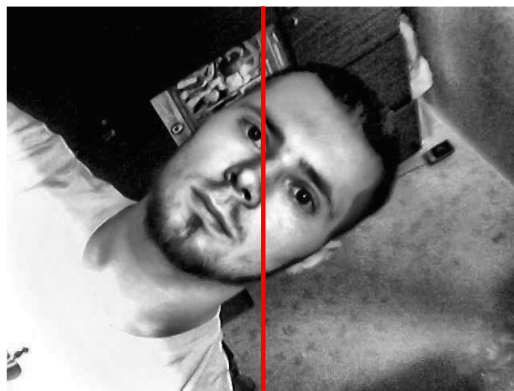


Рис. 5. Результат работы изложенного метода

Все рассмотренные выше методы требуют провести дополнительный этап для определения угла поворота лица пользователя. Имеющееся изображение разбивается на 2 фрагмента, исходя из найденного значения линии симметрии. В каждом изображении производится анализ интенсивностей, таким образом, исходя из эвристического подхода, Наибольшая интенсивность будет приходиться на области глаз в каждом фрагменте (рис.6). Определяются пиковые значения гистограммы, и производится вычисление угла наклона линии пересечения по следующей формуле [1]

$$\theta = \arctg\left(\frac{3|y_1 - y_2|}{N}\right), \quad (3)$$

где

θ – Искомый угол;

y_1, y_2 – координаты положения линий глаз

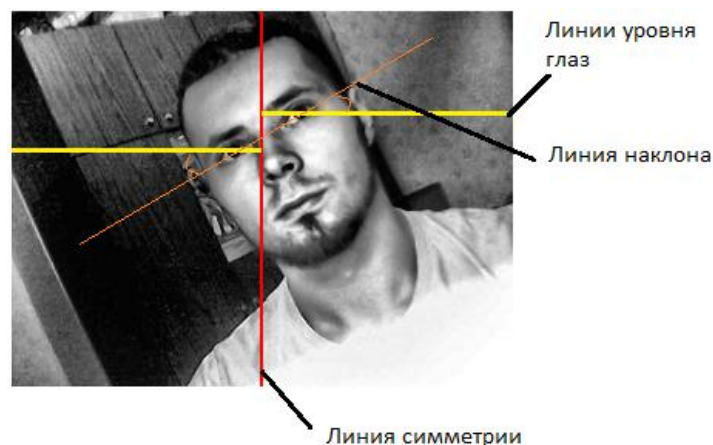


Рис.6. Интерпретация применяемого метода

Избежать эвристического поиска положения глаз позволяет анализ обработанного бинаризованного изображения, с целью выделения областей глаз, которые определяются через специализированные признаки. Данный подход, в отличие от ранее рассмотренных позволяет осуществлять работу с фрагментами, повернутыми до 90 градусов. Производим описание всех непрерывных областей на бинаризованном изображении, используя набор из 5 признаков: Area – площадь области,

BoundingBox – рамка выбранной области, Extent - коэффициент заполнения. Solidity - коэффициент выпуклости, Eccentricity - эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, равными главным моментам инерции объекта [2]. Для разделения областей кандидатов было сформировано множество обучающих примеров, которое позволило сформировать пороговый классификатор. Полученные коэффициенты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Границы классификатора

Признак	Минимум	Максимум
Эксцентриситет	0.2	0.95
Коэффициент заполнения	0.35	0.75
Коэффициент выпуклости	0.6	0.9

Построенная для каждой области изображения оценка на основе сформированного классификатора, позволяет выделить пару наиболее «сильных» кандидатов, которые признаем областью глаз.

Следующий шаг работы с изображением заключается в определении угла поворота изображения лица пользователя. Выполняется проекция области глаза, находящегося выше, на нижнюю растровую линию границы изображения второго глаза. Фактическое расстояние между глазами определяется по следующей формуле:

$$G = \sqrt{(x_{t1} - x_{t2})^2 + (t_{t1} - y_{t2})^2} \quad (4)$$

Затем вычисляется непосредственно угол поворота:

$$\cos(\alpha) = \frac{K_2}{G},$$

$$\alpha_{рад.} = \arccos(\cos(\alpha)) \quad (5)$$

$$\alpha_{фактич.} = \alpha_{рад.} \cdot \frac{180}{\pi}$$

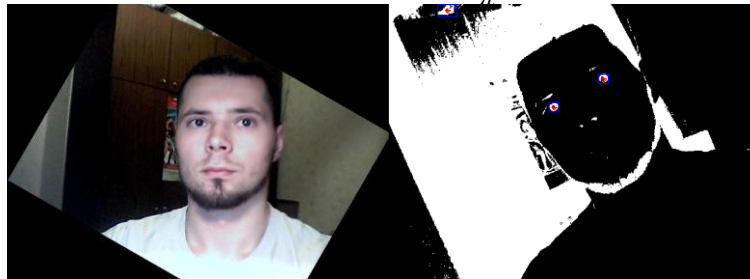


Рис. 7. Исходный и обработанный фрагмент

Величина угла наклона для изображения на рис.7 составляет 30 градусов. Результаты работы рассмотренных методов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Рассматриваемый метод:	Кол-во тестовых фрагментов	Временные затраты на анализ	% Ошибки вычисления
I	40	0.0178 с.	37.5%
II		0.1851 с.	30%
III		0.0912 с.	12.5%
IV		0.28 с.	5%

Заключение:

Все рассмотренные модели обработки были реализованы для изображений, снятых WEB камерами бытового назначения, в среде MatLab. Анализ вычислительной сложности алгоритмов через оценку времени их работы для тестовых изображений показывает достаточно высокую скорость работы всех алгоритмов. Однако качество анализа значительно выше у 3-го и 4-го подхода, что позволяет использовать для нормализации именно эти алгоритмы.

Список литературы

[1] Ву Зуи Линь, экспресс-методы обработки изображений лиц для биометрических систем [Электронный ресурс] URL: <http://www.eltech.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2011/Vu.pdf> (дата обращения: 26.02.2017).

[2] Список функций Image Processing Toolbox: [Электронный ресурс] URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book3/9/regionprops.php> (дата обращения: 22.02.2017).

Брынза Андрей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

В основе построения данной кривой лежит использование рекурсивного алгоритма. Пример полученной кривой 4го порядка в среде Matlab. (Рис.2.)

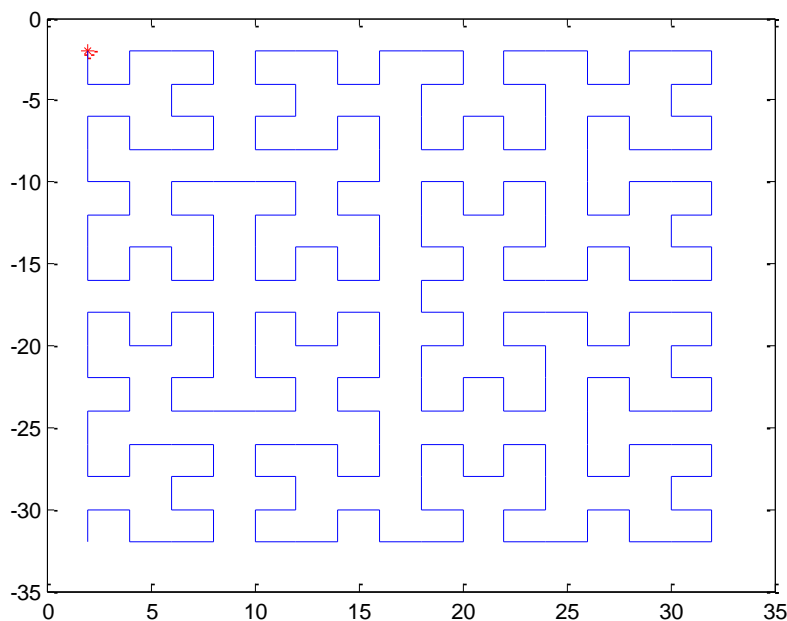


Рис. 2. кривая Гильберта 4го порядка

Данная кривая используется в качестве траектории обхода некоторого анализируемого фрагмента (например, глаза Рис.3.).

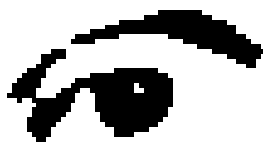


Рис. 3. Анализируемый фрагмент

В результате, вместо классического метода формирования вектора обучающей выборки, путем разложения на вертикальные или горизонтальные полосы, использование данной кривой позволяет уменьшить размер обучающей выборки минимум на 30%, существенно снижая время обучения, а также выделяя наиболее информативные области анализируемого фрагмента. Таким образом, значительно повышается точность классификации.

В таблице 1 приведены затраты времени на формирование обучающей выборки, а также продолжительность обучения алгоритмом адаптивного бустинга на примере выборки из 140 образцов. Исходная размерность каждого фрагмента 80x40 пикселей. Рассмотрены процедуры записи образца с обходом по горизонтальным строкам (рис.4), по вертикальным строкам (рис.5) и через кривую Гильберта (рис.6).

Таблица 1. Анализ временных затрат

Метод обхода	Продолжительность формирования выборки (сек)	Продолжительность обучения НС (сек)
Горизонтальный	4.43	48.79
Вертикальный	5.08	39.7
Кривая Гильберта	16.56	27.62

Несмотря на увеличение продолжительности формирования обучающего вектора, суммарные затраты на обучение уменьшились. Рассмотрим вид сформированных векторов при рассмотренных методах обхода:



Рис. 4. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд влево (горизонтальный обход)



Рис. 5. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд вправо (горизонтальный обход)



Рис. 6. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд влево (вертикальный обход)



Рис. 7. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд вправо (вертикальный обход)



Рис. 8. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд влево (обход по кривой Гильберта)



Рис. 9. Фрагмент вектора обучающей выборки. Взгляд вправо (обход по кривой Гильберта)

Из представленных рисунков 4-7 видно, что будут возникать проблемы с ложным обнаружением из-за высокой схожести некоторых векторов между собой. Фрагменты, представленные на рисунке 8-9 демонстрируют различие между сформированными векторами различных классов. Таким образом, вероятность ложной классификации ниже, чем в традиционных подходах.

В представленном примере в качестве тестового образца взят фрагмент с размерностью 80x40 пикселей, для того, чтобы выполнить охват всего изображения использовалась дважды промоделированная кривая Гильберта 4го порядка. При работе с меньшими изображениями, либо для еще большего снижения размера обучающего вектора имеет смысл использование кривых меньшего или большего порядков.

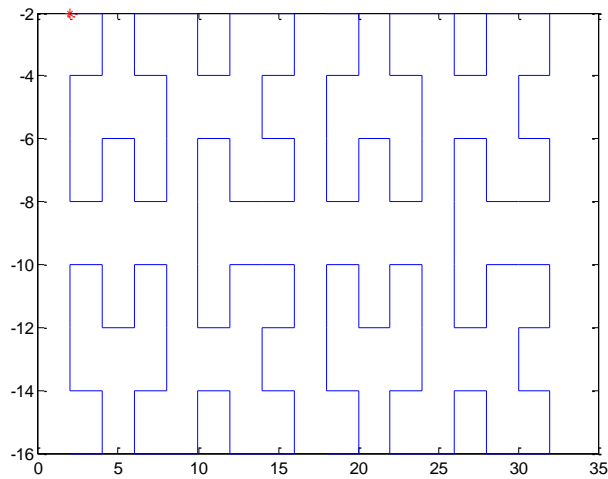


Рис. 7. Кривая 3 го порядка

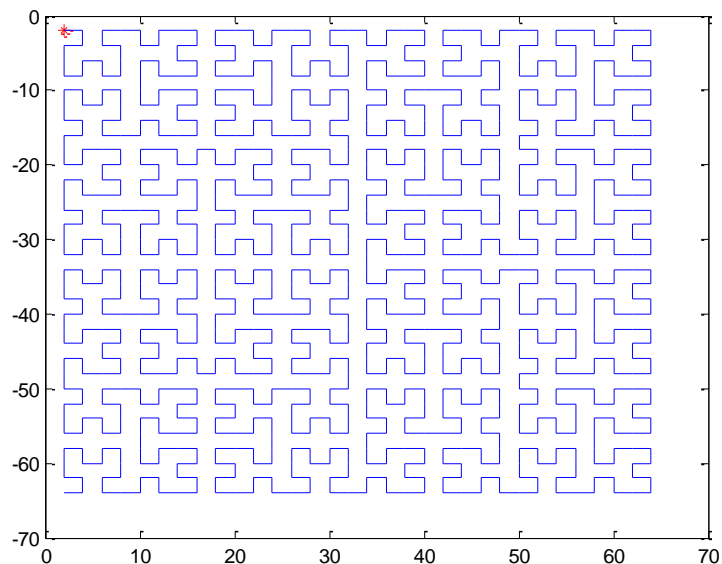


Рис. 8. Кривая 5 го порядка

Рассмотрим результат классификации для каждого подхода на примере тестовой выборки, состоящей из 20 фрагментов. Сравним полученные результаты. Результаты классификации представлены в таблице 2.

Таблица 2. Качество классификации

Метод обхода	Кол-во тестовых фрагментов	Число верно распознанных фрагментов	Величина ошибки, %	Время получения отклика (сек)
Горизонтальный	20	6	70	1.35
Вертикальный		4	85	1.35
Кривая Гильберта		11	45	1.12

Из таблицы 2 видно, что величина ошибки имеет большую величину, это прежде всего связано с небольшим количеством обучающих фрагментов. В любом случае, качество классификации, в подходе, использующем кривую Гильберта ощутимо выше, чем при использовании других подходов. Время получения отклика в первых подходах отличается примерно на 20% от подхода, использующего кривую Гильберта. Это связано с различием в размерности сформированных векторов. Рассмотренный подход позволяет повысить точность классификации, а также снизить временные затраты на обучение модели.

Список литературы

[1] Кривые Гильберта // Математика для школьников и студентов, обучение и образование [Электронный ресурс] URL: <http://hijos.ru/2014/03/07/krivye-gilberta/> (дата обращения: 09.03.2017).

[2] NeuroPro. Нейронные сети, методы обработки и анализа данных. Нейронные сети - точность решения задач [Электронный ресурс] URL: <http://www.neuropro.ru/neu5.shtml> (дата обращения: 19.03.2017).

[3] Хайкин С. Нейрокомпьютеры: полный курс – М: Вильямс, 2006 – с. 114.

Брынза Андрей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

А.В. Боровков, В.О. Трешневская

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Линейный регистр сдвига с обратной связью (РСЛОС) уязвим главным образом из-за его линейности, так же генераторы на базе РСЛОС легко анализируются алгебраическими методами, это облегчает разработку, но увеличивает шансы на взлом генератора.

Более устойчивый шифр потока может быть получен при использовании нелинейного регистра сдвига с обратной связью (NLFSR). Он имеет ту же самую структуру, что и линейный регистр сдвига с обратной связью, за исключением того, что b_m – нелинейная функция b_0, b_1, \dots, b_m . Проблема в том, что не существует математического аппарата, позволяющего провести анализ нелинейных последовательностей. Вот некоторые из проблем, связанных со сдвиговыми регистрами с нелинейной обратной связью:

- В выходной последовательности могут быть смещения, например, единиц может быть больше, чем нулей.
- Максимальный период последовательности может быть меньше, чем ожидалось.
- Период последовательности для различных начальных значений может быть различным.
- Последовательность какое-то время может выглядеть как случайная, а потом "скатываться" к единственному значению.

В сдвиговом регистре с нелинейной обратной связью функция обратной связи может быть произвольной.

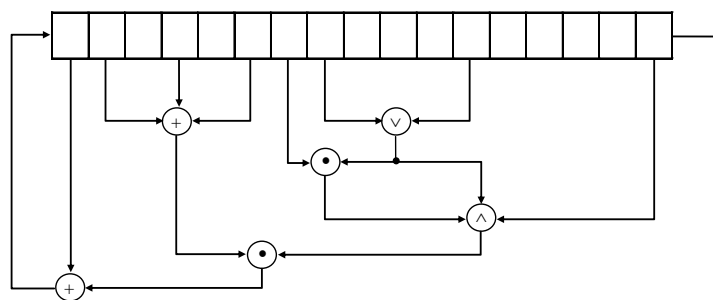


Рис. 1. Сдвиговый регистр с нелинейной обратной связью

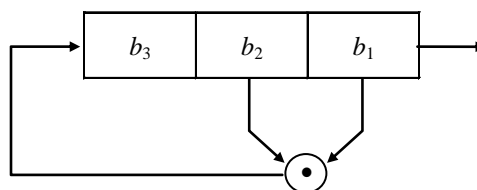


Рис. 2. 3-битовый сдвиговый регистр с нелинейной обратной связью

На Рис. показан 3-битовый генератор со следующей обратной связью: новым битом является произведение первого и второго битов. Если его проинициализировать значением 110, то последовательность внутренних состояний будет следующей:

1 1 0
0 1 1
1 0 1
0 1 0
0 0 1
0 0 0
0 0 0

И так до бесконечности. Выходом является последовательность младших значащих битов:

0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 . . .

Данная последовательность не эффективна.

Последовательность может получиться и хуже. Если начальное значение 100, то следующими состояниями являются 010, 001, а затем всегда 000. Если начальным значением является 111, то оно будет повторяться всегда и с самого начала. (Это можно легко устранить, выполняя XOR крайнего правого бита с нелинейной функцией.)

Однако нелинейный регистр сдвига с обратной связью не имеет общего характера, поскольку нет математического обоснования, как получить такой регистр с максимальным периодом. Можно применить линейный регистр сдвига с обратной связью с максимальным периодом и затем скомбинировать его обратную связь с помощью нелинейной функции.

Плюсом является то, что из-за отсутствия теории анализа сдвиговых регистров с нелинейной обратной связью существует немного способов криптоанализировать потоковые шифры, основанные на таких регистрах. Использовать сдвиговые регистры с нелинейной обратной связью можно, но они нуждаются в более глубоком изучении.

Список литературы

[1] Брюс Шнайер // «Прикладная криптография. 2-ое издание. Протоколы, алгоритмы и исходные тексты на языке С.» - с. 306 - 308, Доступно: URL: https://htrd.su/wiki/_media/zhurnal/2012/03/23/todo_prikladnaja_kriptografija/cryptoshn.pdf (дата обращения: 14.03.2017).

[2] НОУ ИНТУИТ// Нелинейные регистры сдвига с обратной связью [Электронный ресурс] http://www.intuit.ru/studies/courses/552/408/lecture/9360?page=7&keyword_content=FSR(дата обращения: 22.03.2017)

Боровков Андрей Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: HookahXX@yandex.ru

Трешневская Вероника Октавиановна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: votres@yandex.ru

Окар Мин, Д.В. Мельников

ПРОЕКЦИОННО-МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРА КЛАССИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Исследования, направленные на разработку методов аналитического синтеза нелинейных векторных регуляторов для турбогенераторов по их полным нелинейным моделям с каналами взаимосвязанного согласованного управления возбуждением и частотой вращения генераторов в настоящее время, являются актуальными [1]. Такие алгоритмы могут быть построены на использовании метода матричных операторов расчета и проектирования сложных систем [2, 3, 4]. Эти методы основаны на представлении математической модели объекта управления в проекционной (спектральной) области. Данная работа посвящена разработке проекционно-матричной модели турбогенератора классического исполнения. Математическая модель такого генератора можно описать в следующем виде [5, 6]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_p + r_a i_d; \\
 u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega_p + r_a i_q; & \Psi_d &= L_d i_d + M_d i_f + M_d i_{dd}; \\
 & & \Psi_q &= L_q i_q + M_q i_{dq}; \\
 u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f; & \Psi_f &= L_f i_f + M_d i_d + M_d i_{dd}; \\
 0 &= \frac{d\Psi_{dd}}{dt} + r_{dd} i_{dd}; & \Psi_{dd} &= L_{dd} i_{dd} + M_d i_d + M_d i_f; \\
 & & \Psi_{dq} &= L_{dq} i_{dq} + M_q i_q. \\
 0 &= \frac{d\Psi_{dq}}{dt} + r_{dq} i_{dq}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r_a – активное сопротивление обмотки якоря; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; r_{dd} и r_{dq} – активные сопротивления демпферной обмотки возбуждения по осям d и q ; i_d и i_q – токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям; i_f – ток в обмотке возбуждения; i_{dd} и i_{dq} – токи в демпферной обмотке по продольной и поперечной осям машины; ω_p – угловая скорость ротора; Ψ_x – потокосцепление обмотки x ; L_d и L_q – индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осям машины; L_f – индуктивность обмотки возбуждения; L_{dd} и L_{dq} – индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осям машины;

M_d и M_q – взаимные индукции между обмотками по продольной и поперечной осям.

Уравнения (1) можно представить в форме Коши:

$$\begin{aligned}
 i'_d &= a_{11}i_d + a_{12}\omega_p i_q + a_{13}i_f + a_{14}i_{\text{дд}} + a_{15}\omega_p i_{\text{дq}} + g_1u_d + b_1u_f; \\
 i'_q &= a_{21}\omega_p i_d + a_{22}i_q + a_{23}\omega_p i_f + a_{24}\omega_p i_{\text{дд}} + a_{25}i_{\text{дq}} + g_2u_q; \\
 i'_f &= a_{31}i_d + a_{32}\omega_p i_q + a_{33}i_f + a_{34}i_{\text{дд}} + a_{35}\omega_p i_{\text{дq}} + g_3u_d + b_3u_f; \\
 i'_{\text{дд}} &= a_{41}i_d + a_{42}\omega_p i_q + a_{43}i_f + a_{44}i_{\text{дд}} + a_{45}\omega_p i_{\text{дq}} + g_4u_d + b_4u_f; \\
 i'_{\text{дq}} &= a_{51}\omega_p i_d + a_{52}i_q + a_{53}\omega_p i_f + a_{54}\omega_p i_{\text{дд}} + a_{55}i_{\text{дq}} + g_5u_q.
 \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{-r_a(L_f L_{\text{дд}} - M_d^2)}{L_1}; a_{12} = \frac{(L_f L_{\text{дд}} - M_d^2)L_q}{L_1}; a_{13} = \frac{-r_f(M_d^2 - M_d L_{\text{дд}})}{L_1}; \\
 a_{14} &= \frac{(M_d L_f - M_d^2)r_{\text{дд}}}{L_1}; a_{15} = \frac{M_q(L_f L_{\text{дд}} - M_d^2)}{L_1}; g_1 = \frac{(L_f L_{\text{дд}} - M_d^2)}{L_1}; \\
 b_1 &= \frac{(M_d^2 - M_d L_{\text{дд}})}{L_1}; a_{21} = \frac{-L_{\text{дq}}L_d}{L_2}; a_{22} = \frac{-L_{\text{дq}}r_a}{L_2}; a_{23} = \frac{-L_{\text{дq}}M_d}{L_2}; a_{24} = \frac{-L_{\text{дq}}M_d}{L_2}; \\
 a_{25} &= \frac{M_q r_{\text{дq}}}{L_2}; g_2 = \frac{L_{\text{дq}}}{L_2}; a_{31} = \frac{-r_a(M_d^2 - L_{\text{дд}}M_d)}{L_1}; a_{32} = \frac{(M_d^2 - L_{\text{дд}}M_d)L_q}{L_1}; \\
 a_{33} &= \frac{-r_f(L_d L_{\text{дд}} - M_d^2)}{L_1}; a_{34} = \frac{(M_d L_d - M_d^2)r_{\text{дд}}}{L_1}; a_{35} = \frac{M_q(M_d^2 - L_{\text{дд}}M_d)}{L_1}; \\
 g_3 &= \frac{(M_d^2 - L_{\text{дд}}M_d)}{L_1}; b_3 = \frac{(L_d L_{\text{дд}} - M_d^2)}{L_1}; a_{41} = \frac{-r_a(M_d^2 - L_f M_d)}{L_1}; \\
 a_{42} &= \frac{(M_d^2 - L_f M_d)L_q}{L_1}; a_{43} = \frac{-r_f(M_d^2 - M_d L_d)}{L_1}; a_{44} = \frac{(M_d^2 - L_d L_f)r_{\text{дд}}}{L_1}; \\
 a_{45} &= \frac{M_q(M_d^2 - L_f M_d)}{L_1}; g_4 = \frac{(M_d^2 - L_f M_d)}{L_1}; b_4 = \frac{(M_d^2 - M_d L_d)}{L_1}; \\
 a_{51} &= \frac{M_q L_d}{L_2}; a_{52} = \frac{M_q r_a}{L_2}; a_{53} = \frac{M_q M_d}{L_2}; a_{54} = \frac{M_q M_d}{L_2}; a_{55} = \frac{-L_q r_{\text{дq}}}{L_2}; g_5 = \frac{-M_q}{L_2};
 \end{aligned}$$

$$L_1 = L_d L_f L_{\text{дд}} + 2M_d^3 - M_d^2(L_d + L_{\text{дд}} + L_f); L_2 = L_q L_{\text{дq}} - M_q^2.$$

Систему (2) можно записать в векторно-матричном виде:

$$\frac{d\mathbf{I}_\Gamma}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{I}_\Gamma + \omega\mathbf{A}_\omega\mathbf{I}_\Gamma + \mathbf{B}\mathbf{U}. \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_\Gamma = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{\Delta d} \\ i_{\Delta q} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & b_1 \\ 0 & g_2 & 0 \\ g_3 & 0 & b_3 \\ g_4 & 0 & b_4 \\ 0 & g_5 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_\omega = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & a_{35} \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 & a_{45} \\ a_{51} & 0 & a_{53} & a_{54} & 0 \end{bmatrix}.$$

Форма представления модели генератора в виде (2, 3) позволяет перейти к проекционно-матричной модели генератора используя матричные операторы интегрирования, умножения. Действительно интегрируя левую и правую части (2, 3) и переходя в проекционную область получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{i_d} &= a_{11}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_d} + a_{12}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_q}\right) + a_{13}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_f} + a_{14}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_{\Delta d}} + \\ &+ a_{15}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_{\Delta q}}\right) + g_1\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_d} + b_1\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_f}; \\ \mathbf{C}^{i_q} &= a_{21}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_d}\right) + a_{22}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_q} + a_{23}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_f}\right) + \\ &+ a_{24}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_{\Delta d}}\right) + a_{25}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_{\Delta q}} + g_2\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_q}; \\ \mathbf{C}^{i_f} &= a_{31}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_d} + a_{32}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_q}\right) + a_{33}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_f} + a_{34}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_{\Delta d}} + \\ &+ a_{35}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_{\Delta q}}\right) + g_3\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_d} + b_3\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_f}; \\ \mathbf{C}^{i_{\Delta d}} &= a_{41}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_d} + a_{42}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_q}\right) + a_{43}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_f} + a_{44}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_{\Delta d}} + \\ &+ a_{45}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_{\Delta q}}\right) + g_4\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_d} + b_4\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_f}; \\ \mathbf{C}^{i_{\Delta q}} &= a_{51}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_d}\right) + a_{52}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_q} + a_{53}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_f}\right) + \\ &+ a_{54}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{A}_{y_2}\left(\mathbf{C}^{\omega_p} \otimes \mathbf{C}^{i_{\Delta d}}\right) + a_{55}\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{i_{\Delta q}} + g_5\mathbf{A}_\Pi\mathbf{C}^{u_q}. \end{aligned} \quad (4)$$

где \mathbf{C}^x – проекционные характеристики соответствующего процесса; \mathbf{A}_Π – матричный оператор интегрирования; \mathbf{A}_{y_2} – матричный оператор умноже-

ния двух процессов, с алгоритмом вычисления которого можно познакомиться в [7]; \otimes – кронекерово произведение двух векторов.

Систему нелинейных алгебраических уравнений (4) можно компактно записать следующим образом:

$$\mathbf{C}^{\text{I}_\Gamma} = (\mathbf{A} \otimes \mathbf{A}_\text{и}) \mathbf{C}^{\text{I}_\Gamma} + (\mathbf{A}_\omega \otimes \mathbf{A}_\text{и}) (\mathbf{I}_{5 \times 5} \otimes \mathbf{A}_{y_2}) (\mathbf{C}^{\text{I}_\Gamma} \otimes \mathbf{C}^\omega) + (\mathbf{B} \otimes \mathbf{A}_\text{и}) \mathbf{C}^{\text{U}}. \quad (5)$$

где $\mathbf{I}_{5 \times 5}$ – единичная матрица размера 5×5 .

Система (5) описывает проекционно-матричную модель электрической части генератора классического исполнения. Модель приводного механизма должна включать в себя и механическую часть синхронного генератора, так как они вращаются как единое целое. Уравнение движение традиционно записывается в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_\Gamma - M_{\text{эл}}, \quad (6)$$

где J – момент инерции, M_Γ – момент турбины, $M_{\text{эл}}$ – электромагнитный момент генератора. Матрично-проекционная форма (6) имеет вид:

$$\mathbf{C}^\omega = \frac{1}{J} \mathbf{A}_\text{и} (\mathbf{C}^{M_\Gamma} - \mathbf{C}^{M_{\text{эл}}}). \quad (7)$$

Электромагнитный момент рассчитывается в общем случае по формуле:

$$M_{\text{эл}} = i_q \Psi_d - i_d \Psi_q.$$

Если генератор является неявнополюсным ($L_d = L_q$; $M_d = M_q = M$), то

$$M_{\text{эл}} = M (i_f i_q + i_q i_{\text{дd}} - i_d i_{\text{dq}}).$$

или в проекционной области:

$$\mathbf{C}^{M_{\text{эл}}} = M \cdot \mathbf{A}_{y_2} \left[\left(\mathbf{C}^{i_f} \otimes \mathbf{C}^{i_q} \right) + \left(\mathbf{C}^{i_q} \otimes \mathbf{C}^{i_{\text{дd}}} \right) - \left(\mathbf{C}^{i_d} \otimes \mathbf{C}^{i_{\text{dq}}} \right) \right].$$

Для получения полной модели турбогенератора необходимо добавить к (5) и (7) уравнения динамики турбины и нагрузки синхронного генератора в проекционно-матричной форме. Так если в качестве нагрузки генератора рассматривать RL -нагрузку, то ее можно задать следующими уравнениями [8]:

$$L_\text{н} \frac{di_d}{dt} - \omega_p L_\text{н} i_q + R_\text{н} i_d = -u_d,$$

$$L_\text{н} \frac{di_q}{dt} + \omega_p L_\text{н} i_d + R_\text{н} i_q = -u_q.$$

Список литературы

[1] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е. Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы / Под. общ. ред. А.А. Колесникова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 248 с.

[2] Пупков К.А., Егунов Н.Д., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., Рыбин В.М., Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова. – М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

[3] Мельников Д.В., Чжо Ту.А., Окар М., Мин Ч.Ту. Синтез систем регулирования первичных двигателей синхронных генераторов. Фундаментальные исследования. 2016. № 10-3. С. 509-515.

[4] Мельников Д.В., Корнюшин П.Ю., Мин Ч.Ту., Чжо Ту.А., Окар М. Проекционно-матричный подход к анализу и синтезу систем управления электроэнергетических систем. Научное обозрение. 2015. № 2. С. 88-97.

[5] Осин И.Л. Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины / Под. ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1990.

[6] Ахматов М.Г. Синхронные машины продольно-поперечного возбуждения. М.: Высшая школа, 1985.

[7] Мельников Д.В., Егунов Н.Д., Чжо Ту Аунг, Окар Мин. Алгоритм вычисления матричного оператора умножения двух процессов управления. III Всероссийская научно-техническая конференция «Мехатронные системы (теория и проектирование)» - 2016 г. ТулГУ, г. Тула.

[8] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Окар Мин – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: okkamin49@gmail.com

Мельников Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, зав. каф. "Электротехника" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov-dv@yandex.ru

Чжо Ту Аунг, Мельников Д.В.

ПРОЕКЦИОННО-МАТРИЧНАЯ ФОРМА ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ГЕНЕРАТОРА ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время я широкое распространение находят проекционно-матричные методы построения законов управления сложными системами [1]. К сложным системам можно отнести электроэнергетические системы [2], системы управления летательными аппаратами [3] и другие. Например, основными свойствами турбогенератора являются нелинейность, многомерность, колебательность и динамическая связь между турбинной и синхронным генератором. Данная работа посвящена разработке проекционно-матричной модели синхронного генератора продольно-поперечного возбуждения (ППВ) – генератора у которого на роторе расположены две взаимно-перпендикулярные обмотки возбуждения. Это позволяет получить более высокие показатели в отношении устойчивости и управляемости синхронной машины. Математическая модель турбогенератора с ППВ описывается следующими уравнениями [4, 5]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_p + r_a i_d; \\
 u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega_p + r_a i_q; & \Psi_d &= L_d i_d + M_d i_{fd} + M_d i_{dd}; \\
 u_{fd} &= \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + r_{fd} i_{fd}; & \Psi_q &= L_q i_q + M_q i_{dq} + M_q i_{fq}; \\
 u_{fq} &= \frac{d\Psi_{fq}}{dt} + r_{fq} i_{fq}; & \Psi_{fd} &= L_{fd} i_{fd} + M_d i_d + M_d i_{dd}; \\
 0 &= \frac{d\Psi_{dd}}{dt} + r_{dd} i_{dd}; & \Psi_{fq} &= L_{fq} i_{fq} + M_q i_q + M_q i_{dq}; \\
 0 &= \frac{d\Psi_{dq}}{dt} + r_{dq} i_{dq}. & \Psi_{dd} &= L_{dd} i_{dd} + M_d i_d + M_d i_{fd}; \\
 & & \Psi_{dq} &= L_{dq} i_{dq} + M_q i_q + M_q i_{fq}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r_a – активное сопротивление обмотки якоря; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; r_{dd} и r_{dq} – активные сопротивления демпферной обмотки возбуждения по осям d и q ; i_d и i_q – токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям; i_{fd} и i_{fq} – ток в обмотке возбуждения по продольной и поперечной осям; i_{dd} и i_{dq} – токи в демпферной обмотке по

продольной и поперечной осей машины; ω_p – угловая скорость ротора; Ψ_x – потокосцепление обмотки x ; L_d и L_q – индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осей машины; L_{fd} и L_{fq} – индуктивности обмотки возбуждения по продольной и поперечной осей; $L_{\text{дd}}$ и $L_{\text{дq}}$ – индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осей машины; M_d и M_q – взаимные индукции между обмотками по продольной и поперечной осей.

Уравнения (1) можно представить в форме Коши:

$$\begin{aligned}
 i'_d &= a_{11}i_d + a_{12}\omega_p i_q + a_{13}i_{fd} + a_{14}\omega_p i_{fq} + a_{15}i_{\text{дd}} + a_{16}\omega_p i_{\text{дq}} + g_1 u_d + b_1 u_{fd}; \\
 i'_q &= a_{21}\omega_p i_d + a_{22}i_q + a_{23}\omega_p i_{fd} + a_{24}i_{fq} + a_{25}\omega_p i_{\text{дd}} + a_{26}i_{\text{дq}} + g_2 u_q + b_2 u_{fq}; \\
 i'_{fd} &= a_{31}i_d + a_{32}\omega_p i_q + a_{33}i_{fd} + a_{34}\omega_p i_{fq} + a_{35}i_{\text{дd}} + a_{36}\omega_p i_{\text{дq}} + g_3 u_d + b_3 u_{fd}; \\
 i'_{fq} &= a_{41}\omega_p i_d + a_{42}i_q + a_{43}\omega_p i_{fd} + a_{44}i_{fq} + a_{45}\omega_p i_{\text{дd}} + a_{46}i_{\text{дq}} + g_4 u_q + b_4 u_{fq}; \\
 i'_{\text{дd}} &= a_{51}i_d + a_{52}\omega_p i_q + a_{53}i_{fd} + a_{54}\omega_p i_{fq} + a_{55}i_{\text{дd}} + a_{56}\omega_p i_{\text{дq}} + g_5 u_d + b_5 u_{fd}; \\
 i'_{\text{дq}} &= a_{61}\omega_p i_d + a_{62}i_q + a_{63}\omega_p i_{fd} + a_{64}i_{fq} + a_{65}\omega_p i_{\text{дd}} + a_{66}i_{\text{дq}} + g_6 u_q + b_6 u_{fq}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{-r_a(L_{fd}L_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; a_{12} = \frac{(L_{fd}L_{\text{дd}} - M_d^2)L_q}{L_1}; a_{13} = \frac{-r_{fd}(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; \\
 a_{14} &= \frac{M_q(L_{fd}L_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; a_{15} = \frac{(M_dL_{fd} - M_d^2)r_{\text{дd}}}{L_1}; a_{16} = \frac{M_q(L_{fd}L_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; \\
 g_1 &= \frac{(L_{fd}L_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; b_1 = \frac{(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; a_{21} = \frac{-L_d(L_{fq}L_{\text{дq}} - M_q^2)}{L_2}; \\
 a_{22} &= \frac{r_a(L_{fq}L_{\text{дq}} - M_q^2)}{L_2}; a_{23} = \frac{M_d(L_{fq}L_{\text{дq}} - M_q^2)}{L_2}; a_{24} = \frac{-r_{fq}(M_q^2 - M_qL_{\text{дq}})}{L_2}; \\
 a_{25} &= \frac{M_d(L_{fq}L_{\text{дq}} - M_q^2)}{L_2}; a_{26} = \frac{(M_qL_{fq} - M_q^2)r_{\text{дq}}}{L_2}; g_2 = \frac{(L_{fq}L_{\text{дq}} - M_q^2)}{L_2}; \\
 b_2 &= \frac{(M_q^2 - M_qL_{\text{дq}})}{L_2}; a_{31} = \frac{-r_a(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; a_{32} = \frac{(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})L_q}{L_1}; \\
 a_{33} &= \frac{-r_{fd}(L_dL_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; a_{34} = \frac{M_q(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; a_{35} = \frac{M_d(L_d - M_d)r_{\text{дd}}}{L_1}; \\
 a_{36} &= \frac{M_q(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; g_3 = \frac{(M_d^2 - M_dL_{\text{дd}})}{L_1}; b_3 = \frac{(L_dL_{\text{дd}} - M_d^2)}{L_1}; \\
 a_{41} &= \frac{-L_d(M_q^2 - M_qL_{\text{дq}})}{L_2}; a_{42} = \frac{-r_a(M_q^2 - M_qL_{\text{дq}})}{L_2}; a_{43} = \frac{-M_d(M_q^2 - M_qL_{\text{дq}})}{L_2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{44} &= \frac{-r_{fq}(L_q L_{dq} - M_q^2)}{L_2}; a_{45} = \frac{-M_d(M_q^2 - M_q L_{dq})}{L_2}; a_{46} = \frac{M_q(L_q - M_q)r_{dq}}{L_2}; \\
g_4 &= \frac{(M_q^2 - M_q L_{dq})}{L_2}; b_4 = \frac{(L_q L_{dq} - M_q^2)}{L_2}; a_{51} = \frac{-r_a(M_d^2 - M_d L_{fd})}{L_1}; \\
a_{52} &= \frac{(M_d^2 - M_d L_{fd})L_q}{L_1}; a_{53} = \frac{-r_{fd}(M_d^2 - M_d L_d)}{L_1}; a_{54} = \frac{M_q(M_d^2 - M_d L_{fd})}{L_1}; \\
a_{55} &= \frac{(M_d^2 - L_d L_{fd})r_{dd}}{L_1}; a_{56} = \frac{M_q(M_d^2 - M_d L_{fd})}{L_1}; g_5 = \frac{(M_d^2 - M_d L_{fd})}{L_1}; \\
b_5 &= \frac{(M_d^2 - M_d L_d)}{L_1}; a_{61} = \frac{-L_d(M_q^2 - M_q L_{fq})}{L_2}; a_{62} = \frac{-r_a(M_q^2 - M_q L_{fq})}{L_2}; \\
a_{63} &= \frac{-M_d(M_q^2 - M_q L_{fq})}{L_2}; a_{64} = \frac{-r_{fq}(M_q^2 - M_q L_q)}{L_2}; a_{65} = \frac{-M_d(M_q^2 - M_q L_{fq})}{L_2}; \\
a_{66} &= \frac{(M_q^2 - L_q L_{fq})r_{dq}}{L_2}; g_6 = \frac{(M_q^2 - M_q L_{fq})}{L_2}; b_6 = \frac{(M_q^2 - M_q L_q)}{L_2}; \\
L_1 &= L_d L_{fd} L_{dd} + 2M_d^3 - M_d^2(L_d + L_{fd} + L_{dd}); L_2 = L_q L_{fq} L_{dq} + 2M_q^3 - M_q^2(L_q + L_{fq} + L_{dq}).
\end{aligned}$$

Систему (2) удобно представить в матричном виде:

$$\frac{d\mathbf{I}_r}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{I}_r + \omega\mathbf{A}_\omega\mathbf{I}_r + \mathbf{B}\mathbf{U}. \quad (3)$$

$$\text{где } \mathbf{I}_r = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_{fq} \\ i_{dd} \\ i_{dq} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & b_1 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & b_2 \\ g_3 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & g_4 & 0 & b_4 \\ g_5 & 0 & b_5 & 0 \\ 0 & g_6 & 0 & b_6 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_{fd} \\ u_{fq} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & a_{26} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & a_{46} \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & a_{62} & 0 & a_{64} & 0 & a_{66} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_\omega = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & a_{16} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 & a_{36} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 & a_{45} & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & a_{54} & 0 & a_{56} \\ a_{61} & 0 & a_{63} & 0 & a_{65} & 0 \end{bmatrix}.$$

Форма представления модели генератора в виде (2, 3) позволяет перейти к проекционно-матричной модели генератора используя матричные

операторы интегрирования, умножения. Действительно интегрируя левую и правую части (2, 3) и переходя в проекционную область получим:

$$\begin{aligned}
C^{i_d} &= a_{11}A_{\text{и}}C^{i_d} + a_{12}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_q} \right) + a_{13}A_{\text{и}}C^{i_{fd}} + a_{14}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fq}} \right) + \\
&\quad + a_{15}A_{\text{и}}C^{i_{nd}} + a_{16}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nq}} \right) + g_1A_{\text{и}}C^{u_d} + b_1A_{\text{и}}C^{u_{fd}}; \\
C^{i_q} &= a_{21}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_d} \right) + a_{22}A_{\text{и}}C^{i_q} + a_{23}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fd}} \right) + a_{24}A_{\text{и}}C^{i_{fq}} + \\
&\quad + a_{25}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nd}} \right) + a_{26}A_{\text{и}}C^{i_{nq}} + g_2A_{\text{и}}C^{u_q} + b_2A_{\text{и}}C^{u_{fq}}; \\
C^{i_{fd}} &= a_{31}A_{\text{и}}C^{i_d} + a_{32}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_q} \right) + a_{33}A_{\text{и}}C^{i_{fd}} + a_{34}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fq}} \right) + \\
&\quad + a_{35}A_{\text{и}}C^{i_{nd}} + a_{36}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nq}} \right) + g_3A_{\text{и}}C^{u_d} + b_3A_{\text{и}}C^{u_{fd}}; \\
C^{i_{fq}} &= a_{41}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_d} \right) + a_{42}A_{\text{и}}C^{i_q} + a_{43}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fd}} \right) + a_{44}A_{\text{и}}C^{i_{fq}} + \\
&\quad + a_{45}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nd}} \right) + a_{46}A_{\text{и}}C^{i_{nq}} + g_4A_{\text{и}}C^{u_q} + b_4A_{\text{и}}C^{u_{fq}}; \\
C^{i_{nd}} &= a_{51}A_{\text{и}}C^{i_d} + a_{52}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_q} \right) + a_{53}A_{\text{и}}C^{i_{fd}} + a_{54}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fq}} \right) + \\
&\quad + a_{55}A_{\text{и}}C^{i_{nd}} + a_{56}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nq}} \right) + g_5A_{\text{и}}C^{u_d} + b_5A_{\text{и}}C^{u_{fd}}; \\
C^{i_{nq}} &= a_{61}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_d} \right) + a_{62}A_{\text{и}}C^{i_q} + a_{63}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{fd}} \right) + a_{64}A_{\text{и}}C^{i_{fq}} + \\
&\quad + a_{65}A_{\text{и}}A_{y_2} \left(C^{\omega_p} \otimes C^{i_{nd}} \right) + a_{66}A_{\text{и}}C^{i_{nq}} + g_6A_{\text{и}}C^{u_q} + b_6A_{\text{и}}C^{u_{fq}}.
\end{aligned} \tag{4}$$

где C^x – проекционные характеристики соответствующего процесса; $A_{\text{и}}$ – матричный оператор интегрирования; A_{y_2} – матричный оператор умножения двух процессов, с алгоритмом вычисления которого можно познакомиться в [6]; \otimes – кронекерово произведение двух векторов.

Систему нелинейных алгебраических уравнений (4) можно компактно записать следующим образом:

$$C^{\text{I}_r} = (A \otimes A_{\text{и}})C^{\text{I}_r} + (A_{\omega} \otimes A_{\text{и}})(I_{6 \times 6} \otimes A_{y_2})(C^{\text{I}_r} \otimes C^{\omega}) + (B \otimes A_{\text{и}})C^U. \tag{5}$$

где $I_{6 \times 6}$ – единичная матрица размера 6×6 .

Система (5) описывает проекционно-матричную модель электрической части генератора с ППВ. Модель приводного механизма должна включать в себя и механическую часть синхронного генератора, так как они вращаются как единое целое. Уравнение движение традиционно записывается в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{\text{эл}}, \tag{6}$$

где J – момент инерции, M_T – момент турбины, $M_{эл}$ – электромагнитный момент генератора. Матрично-проекционная форма (6) имеет вид:

$$C^\omega = \frac{1}{J} A_{II} (C^{M_T} - C^{M_{эл}}). \quad (7)$$

Электромагнитный момент рассчитывается в общем случае по формуле:

$$M_{эл} = i_q \Psi_d - i_d \Psi_q.$$

Если генератор является неявнополносным ($L_d = L_q$; $M_d = M_q = M$), то

$$M_{эл} = M [i_q (i_{fd} + i_{dd}) - i_d (i_{fq} + i_{dq})].$$

или в проекционной области:

$$C^{M_{эл}} = M \cdot A_{y_2} \left[C^{i_q} \otimes (C^{i_{fd}} + C^{i_{dd}}) - C^{i_d} \otimes (C^{i_{fq}} + C^{i_{dq}}) \right].$$

Для получения полной модели турбогенератора необходимо добавить к (5) и (7) уравнения динамики турбины и нагрузки синхронного генератора в проекционно-матричной форме.

Список литературы

- [1] Пупков К.А., Егунов Н.Д., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., Рыбин В.М., Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова. – М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.
- [2] Мельников Д.В., Корнюшин П.Ю., Мин Ч.Ту., Чжо Ту.А., Окар М. Проекционно-матричный подход к анализу и синтезу систем управления электроэнергетических систем. Научное обозрение. 2015. № 2. С. 88-97.
- [3] Межирицкий Е.Л., Пупков К.А., Егунов Н.Д., Никифоров В.М., Орлов С.В. Применение метода матричных операторов для решения задач синтеза регуляторов в системах управления летательными аппаратами. Труды ФГУП НППАП. Системы и приборы управления. 2011. № 4. С. 14-33.
- [4] Осин И.Л. Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины / Под. ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1990.
- [5] Ахматов М.Г. Синхронные машины продольно-поперечного возбуждения. М.: Высшая школа, 1985.
- [6] Мельников Д.В., Егунов Н.Д., Чжо Ту Аунг, Окар Мин. Алгоритм вычисления матричного оператора умножения двух процессов управления. III Всероссийская научно-техническая конференция «Мехатронные системы (теория и проектирование)» - 2016 г. ТулГУ, г. Тула. Журнал «Вестник Тульского Государственного Университета» Серия: Системы управления, Выпуск 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С.83-86.

Чжо Ту Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawthuaung310@gmail.com

Мельников Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, зав. каф. "Электротехника" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov-dv@yandex.ru

Со Нэй Лин Аунг, Д.А. Акименко

ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭГСП В КЛАССЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлический следящий привод нашел широкое применение в качестве исполнительного устройства в различных системах управления сложными объектами и технологическими процессами в силу своих известных достоинств. Поэтому при проектировании таких систем управления большой интерес представляем адекватность математической модели реальному приводу. Ниже рассматривается решение задачи параметрической идентификации ЭГСП с применением проекционных методов.

Математическая модель привода представлена системой уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} m_3 \frac{d^2}{dt^2} x(t) + (K_3^{em} + K_{moc} K_{эмн} A_3) \frac{d}{dt} x(t) + (C_3 + C_2) x(t) &= \\ &= K_{эу} K_{эмн} A_3 (u(t) - K_{oc} y(t)); \\ \frac{V}{2E} \frac{d}{dt} p(t) &= \frac{1}{4} K_3 x(t) \left[-\alpha_p K_3 x(t) \text{sign}(x) + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(\alpha_p K_3 x(t))^2 + 8(p_{ном} - p_{cl} - p(t) \text{sign}(x))} \right] - A_{2y} \frac{d}{dt} y(t); \\ m_{2y} \frac{d^2}{dt^2} y(t) + K_{2y}^{em} \frac{d}{dt} y(t) + C_{2y} y(t) &= A_{2y} p(t) - F_n(t). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Особенностью полученной модели является учет характеристики насоса при составлении уравнения баланса расходов рабочей жидкости, протекающей через золотниковый распределитель.

Очевидно, что полученная модель привода является существенно нелинейной, что затрудняет применение проекционных методов для решения задач анализа и синтеза (в нашем случае задачи идентификации числовых значений параметров привода по результатам испытаний).

Линеаризуем уравнения расходов путем представления в виде степенного ряда с удержанием линейных слагаемых. В результате получим:

$$Q_3(t) \approx Q_{30} + k_{Qx} x(t) - k_{Qp} p(t)$$

где $Q_{30} = Q_3(t) \Big|_{\substack{x=x_0 \\ p=p_0}}$;

$$k_{Qx} = \left. \frac{\partial Q_3(x, p)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ p=p_0}} =$$

$$= \left. \frac{1}{4} \frac{k_3 \left(-k_3 \alpha_p x(t) \operatorname{sign}(x) + \sqrt{k_3^2 \alpha_p^2 x^2(t) + 8(p_{\text{ном}} - p_{\text{сл}} - p(t) \operatorname{sign}(x))} \right)^2}{\sqrt{k_3^2 \alpha_p^2 x^2(t) + 8(p_{\text{ном}} - p_{\text{сл}} - p(t) \operatorname{sign}(x))}} \right|_{\substack{x=x_0 \\ p=p_0}},$$

$$k_{Qp} = \left. \frac{\partial Q_3(x, p)}{\partial p} \right|_{\substack{x=x_0 \\ p=p_0}} = \left. \frac{k_3 x(t) \operatorname{sign}(x)}{\sqrt{k_3^2 \alpha_p^2 x^2(t) + 8(p_{\text{ном}} - p_{\text{сл}} - p(t) \operatorname{sign}(x))}} \right|_{\substack{x=x_0 \\ p=p_0}}$$

Очевидно, что значения коэффициентов k_{Qx} , k_{Qp} и постоянной составляющей Q_{30} зависят от выбора x_0 и p_0 .

В результате система уравнений (3) можно записать в виде:

$$\begin{cases} m_3 \ddot{x}(t) + (K_3^{6m} + K_{\text{мос}} K_{\text{эmn}} A_3) \dot{x}(t) + (C_3 + C_2) x(t) = \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad = K_{\text{эy}} K_{\text{эmn}} A_3 (u(t) - K_{\text{ос}} y(t)); \\ \frac{V}{2E} \dot{p}(t) + k_{Qp}(x_0, p_0) p(t) = k_{Qx}(x_0, p_0) x(t) + Q_{30}(x_0, p_0) - A_{2y} \dot{y}(t); \\ m_{2y} \ddot{y}(t) + K_{2y}^{6m} \dot{y}(t) + C_{2y} y(t) = A_{2y} p(t) - F_n(t). \end{cases} \quad (4)$$

Кроме того предполагается, что привод работает в режиме, при котором выполняются ограничения: $|x(t)| \leq x_{\text{max}}$; $|p(t)| \leq p_{\text{ном}} - p_{\text{сл}}$.

Выбрав некоторый ортонормированный базис $\Phi(t) = [\phi_1(t) \phi_2(t) \dots \phi_l(t)]^T$ и переходя к рассмотрению спектральных характеристик сигналов в выбранном базисе, получим следующую систему уравнений в операторной форме

$$\begin{cases} \mathbf{C}^x = \mathbf{A}_{\text{эy}} (\mathbf{C}^u - K_{\text{ос}} \mathbf{C}^y); \\ \mathbf{C}^p = \mathbf{A}_{2y} (K_{Qx}(x_0, p_0) \mathbf{C}^x + \mathbf{C}^{Q_{30}}(x_0, p_0) - \mathbf{A}_{\text{ос}} \mathbf{C}^y); \\ \mathbf{C}^y = \mathbf{A}_{2\partial} (A_{2y} \mathbf{C}^p - \mathbf{C}^{F_n}), \end{cases} \quad (5)$$

где $\mathbf{A}_{\text{эy}}$ – матричный оператор в выбранном базисе эквивалентный пере-

даточной функции $W_{\text{эy}}(s) = \frac{K_{\text{эy}} K_{\text{эmn}} A_3}{m_3 s^2 + (K_3^{6m} + K_{\text{мос}} K_{\text{эmn}} A_3) s + C_3 + C_2}$; \mathbf{A}_{2y} –

эквивалентный $W_{zy}(s) = \frac{1}{V / 2E \cdot s + k_{Qp}(x_0, p_0)}$; оператор \mathbf{A}_{oc} эквивалентен

$W_{oc}(s) = A_{z\psi} \cdot s$; оператор $\mathbf{A}_{z\partial}$ эквивалентен $W_{z\partial}(s) = \frac{1}{m_{z\psi} \cdot s^2 + K_{z\psi}^{em} s + C_{z\psi}}$.

Из последней системы находим спектральную характеристику \mathbf{C}^y , которая определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^y(P, x_0, p_0) &= \mathbf{A}_{yu} \mathbf{C}^u + \mathbf{A}_{yQ} \mathbf{C}^{Q_{n0}} + \mathbf{A}_{yF} \mathbf{C}^{F_n} \\ \mathbf{A}_{yu} &= \mathbf{A}_y^{-1} (K_{Qx}(x_0, p_0) A_{z\psi} \mathbf{A}_{z\partial} \mathbf{A}_{zy}(x_0, p_0) \mathbf{A}_{\psi y}); \\ \mathbf{A}_{yQ} &= \mathbf{A}_y^{-1} (A_{z\psi} \mathbf{A}_{z\partial} \mathbf{A}_{zy}(x_0, p_0)); \\ \mathbf{A}_{yF} &= -\mathbf{A}_y^{-1} \mathbf{A}_{z\partial}; \\ \mathbf{A}_y &= \mathbf{I} + A_{z\psi} \mathbf{A}_{z\partial} \mathbf{A}_{zy}(x_0, p_0) (K_{Qx} K_{oc} \mathbf{A}_{\psi y} + \mathbf{A}_{oc}); \end{aligned}$$

где P – множество параметров привода, числовые значения которых подлежат уточнению по результатам эксперимента.

В качестве критерия совладения выхода модели с экспериментально полученным используется функционал

$$\begin{aligned} J(P, x_0, p_0) &= \left[\int_0^T (y_{\text{экс}}(t) - y(t, P, x_0, p_0))^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left[\left(\mathbf{C}^{y_{\text{экс}}} - \mathbf{C}^y(P, x_0, p_0) \right)^T \cdot \left(\mathbf{C}^{y_{\text{экс}}} - \mathbf{C}^y(P, x_0, p_0) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6) \end{aligned}$$

Следовательно, задача параметрической идентификации сводится к задаче условной оптимизации функционала (6) на множество допустимых значений искомых параметров P .

В результате построен алгоритм решения поставленной задачи, особенностью которого является уточнение x_0 и p_0 на каждом шаге оптимизации.

Решая задачу параметрической идентификации изложенным выше подходом, по экспериментальным данным уточнены числовые значения параметров модели, которые зависят от условий эксплуатации и свойств рабочей жидкости (плотность рабочей жидкости; модуль объемной упругости рабочей жидкости; коэффициенты вязкого трения подвижных частей привода), а также параметры настройки элементов привода (коэффициент передачи электронного усилителя; коэффициент передачи обратной связи) и другие параметры, числовые значения которых напрямую невозможно определить с достаточной степенью точности. В качестве начальных значений были выбраны справочные значения искомых параметров и средние значения, которые были определены в процессе эксплуатации аналогичный

приводов, а в качестве ограничений, накладываемых на искомые параметры, выбраны возможные предельные изменения искомых параметров.

На рисунке 1 представлены результаты идентификации выходного сигнала привода.

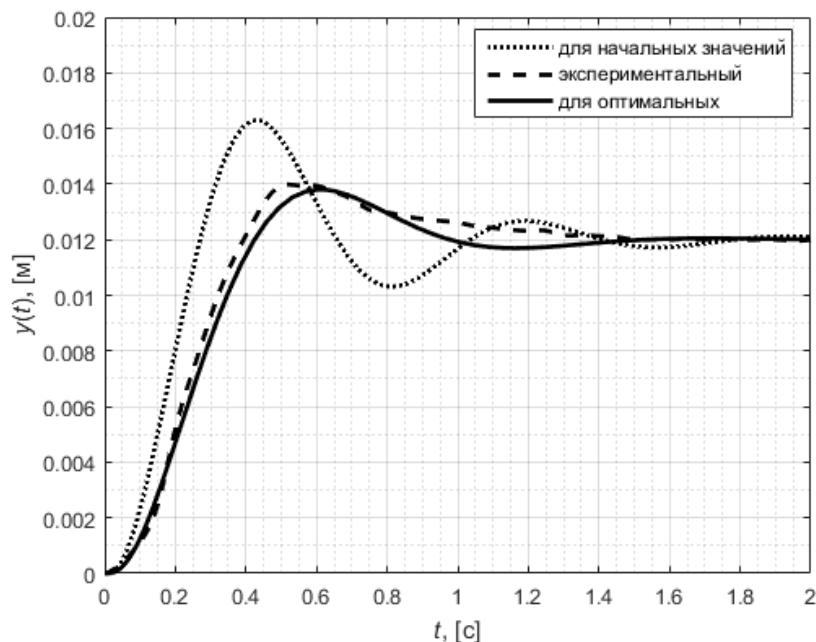


Рис. 1.

Список литературы

[1] Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.

[2] Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Под ред. Т.М. Башта. – М.: Альянс, 2011. – 424 с.

[3] Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

[4] Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. В двух частях / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012.

[5] Системы управления летательными аппаратами / Под ред. проф. Г.Н. Лебедева. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 756 с.

Со Нэй Лин Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: soenla@gmail.com

Акименко Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru

Чжо Линн, Д.А. Акименко

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлические приводы нашли широкое применение в различных отраслях техники в силу ряда их достоинств, к которым можно отнести значительную удельную мощность (отношение мощности, развиваемая приводом, к его массе), высокое быстродействие и возможность позиционировать выходное звено с достаточной степенью точности. Однако гидравлические приводы относятся к нелинейным объектам, что затрудняет синтез управления приводом, обеспечивающего требуемые динамические характеристики. Ниже рассматривается подход к решению задачи построения алгоритма управления на основе концепции обратных задач динамики электрогидравлическим приводом, состоящего конструктивно из электрогидравлического усилителя и исполнительного гидроцилиндра.

Математическая модель привода с учетом упрощений представлена системой уравнений

$$\begin{cases} x(t) = K_{эц} u(t); \\ \dot{p}(t) = \frac{2E}{V} \left[K_3 x(t) \sqrt{\frac{1}{2} (p_n - p_{cl} - p(t) \cdot \text{sign}(x(t)))} - A_{ц} \dot{y}(t) \right]; \\ \ddot{y}(t) = \frac{1}{m_{ц}} [A_{ц} p(t) - C_{ц} y(t) - K_{cm}^{ц} \text{sign}(\dot{y}(t))]. \end{cases} \quad (1)$$

Задача ставится следующая: необходимо синтезировать управление, которое переводит рассматриваемый объект из некоторого начального состояния $y(0)$ в заданное конечное $y(\infty) = y^0 = \text{const}$, при этом управляемый процесс с требуемой точностью должен следовать за эталонным процессом, которые определяется в соответствии с техническим заданием на проектируемую систему [1]. Эталонная модель определяется уравнением

$$\ddot{y}^*(t) + a_3 \ddot{y}^*(t) + a_2 \dot{y}^*(t) + a_1 \dot{y}^*(t) + a_0 y^*(t) = a_0 y^0, \quad (2)$$

где коэффициенты a_i , $i=0, \dots, 3$, определяются исходя из требований технического задания к динамике проектируемого объекта.

Исключив в системе (1) переменную $p(t)$ модель рассматриваемого привода можно представить уравнением

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{Vm_{zu}} \left[2A_{zu}EK_3K_{эzy}u \sqrt{\frac{1}{2} \left(p_n - p_{cl} - \frac{1}{A_{zu}} [m_{zu}\ddot{y} + K_{zu}^{em}\dot{y} + C_{zu}y] \text{sign}(u) \right)} - (2A_{zu}^2E + C_{zu}V)\dot{y} - K_{zu}^{em}V\ddot{y} \right]. \quad (3)$$

Степень близости процессов ЭГП и эталонной модели определим функционалом

$$J(t, u) = \frac{1}{2} [\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t, u)]^2.$$

Управляющую функцию определим дифференциальным соотношением:

$$\frac{d}{dt}u(t) = \lambda \frac{d}{du}J(t, u) = -\lambda (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t, u)) \frac{\partial}{\partial u} f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}), \quad (4)$$

где $\lambda = \text{const}$, а $f(u, y, \dot{y}, \ddot{y})$ - правая часть уравнения (3).

Обозначим $K_u = -\lambda \left(\frac{\partial}{\partial u} f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}) \right)_0$, где

$$\left(\frac{\partial}{\partial u} f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}) \right)_0 = \left(\frac{2A_{zu}EK_3K_{эzy}}{Vm_{zu}} \sqrt{\frac{1}{2} \left(p_n - p_{cl} - \frac{1}{A_{zu}} [m_{zu}\ddot{y} + K_{zu}^{em}\dot{y} + C_{zu}y] \right)} \right)_0 \quad (5)$$

соответствует точке состояния y^0 .

В результате получим закон управления в дифференциальной форме

$$\frac{d}{dt}u(t) = K_u (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t)). \quad (6)$$

Значение $\ddot{y}_s(t)$ находим из дифференциального уравнения эталонной модели, соответствующего передаточной функции, после однократного интегрирования при нулевых начальных условиях:

$$\ddot{y}_s(t) = a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - a_3 \ddot{y}(t).$$

Проинтегрировав последнее выражение, получим в окончательном виде уравнение алгоритма управления:

$$u(t) = K_u (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t)),$$

$$\ddot{y}_s(t) = \int_0^t \left[a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) \right] dt - a_2 y(t) - a_3 \dot{y}(t). \quad (7)$$

Соответствующая структурная схема представлена на Рис. 3.

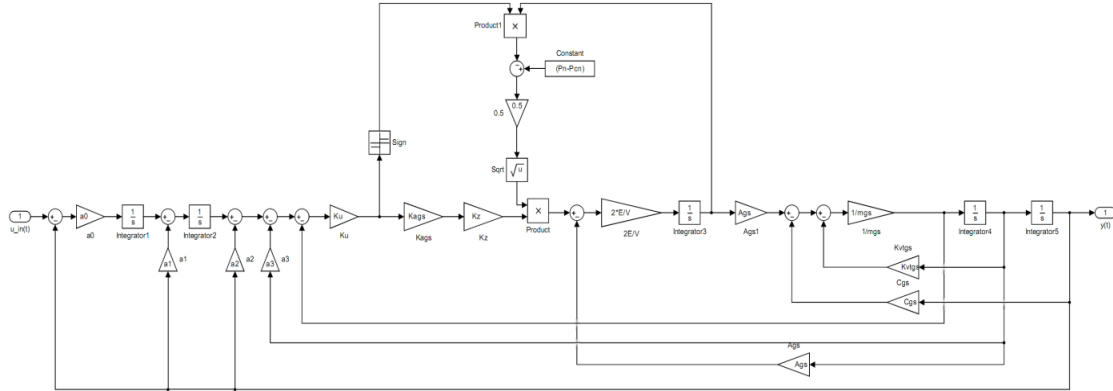


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы (Simulink)

Рассмотрим второй вариант построения управления. Управляющую функцию определим дифференциальным соотношением:

$$\frac{d^2}{dt^2}u(t) + h \frac{d}{dt}u(t) = \lambda \frac{dG(u)}{du} \quad (8)$$

где h, λ - константы.

С учетом выражения для градиента получим:

$$\ddot{u}(t) + h\dot{u}(t) = K_u (\ddot{y}^*(t) - \ddot{y}(t))$$

где

$$\ddot{y}^*(t) = a_0 \int_0^t (y^0 - y) dt - a_1 y - a_2 \dot{y} - a_3 \ddot{y} \quad (9)$$

или, с учетом последнего выражения получим:

$$\ddot{u}(t) + h\dot{u}(t) = K_u \left[a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - a_3 \ddot{y}(t) - \ddot{y}(t) \right]$$

или

$$\ddot{u}(t) = K_u \left[a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - \frac{h}{K_u} \dot{u}(t) - a_3 \ddot{y}(t) - \ddot{y}(t) \right] \quad (10)$$

трижды интегрируя последнее выражение при нулевых начальных условиях получим:

$$u(t) = K_u \left[\int_0^t \left(\int_0^t \left(\int_0^t \left\{ a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) \right\} dt - a_2 y(t) - \frac{h}{K_u} u(t) \right) dt - a_3 y(t) \right) dt - y(t) \right] \quad (11)$$

Соответствующая структурная схема представлена на Рис. 3.

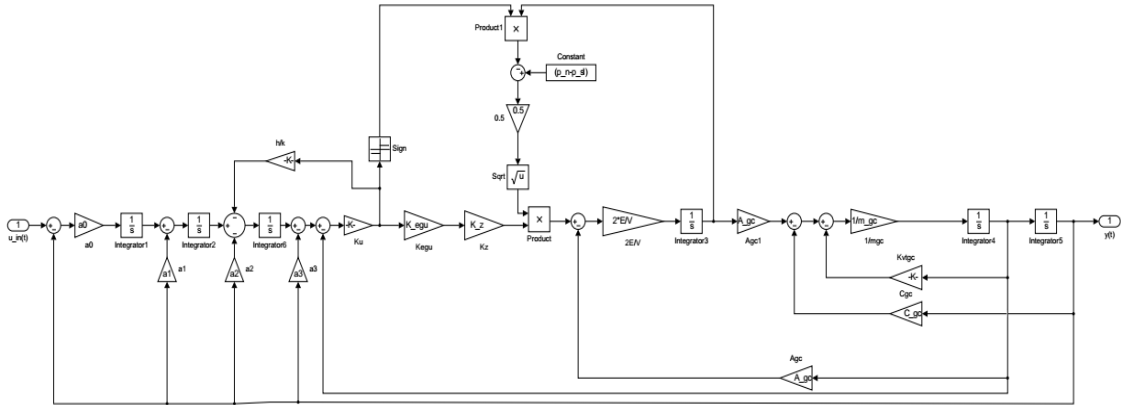


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы

На рисунке 3 представлены результаты моделирования полученных замкнутых систем управления приводом.

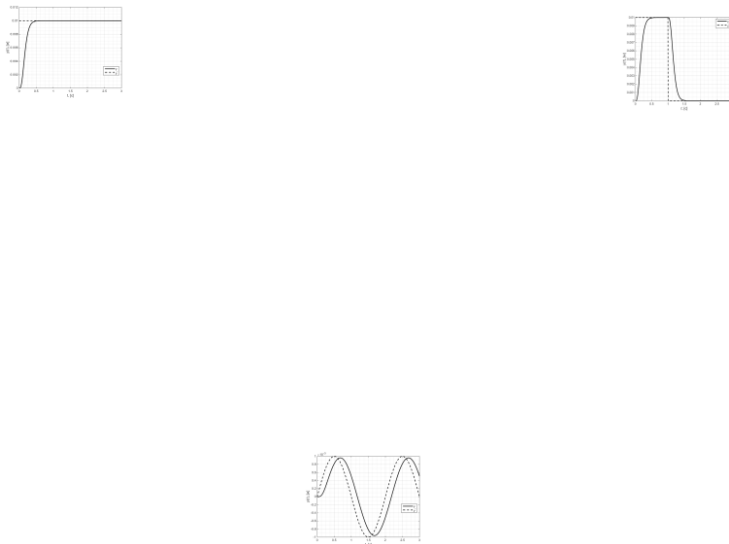


Рис. 3. Графики выходного сигнала приводе с построенным управлением, этолонной модели

Заключение

Таким образом, рассмотренный выше подход построения управления электрогидравлическим приводом, основанный на концепции обратных задач динамики, позволяет построить замкнутую систему управления приводом, обеспечивающую динамические характеристики привода, близкие к заданным эталонным. При построении управления рассмотрены три подхода. Первый основан на минимизации функционала, определяющего ошибку между реальным перемещением штока и заданным эталонным, по градиентной схеме первого порядка. В результате построено управление, для формирования которого необходима информация о текущем положении штока, его скорости и ускорении, что вызывает некоторые сложности при реализации полученного алгоритма.

Список литературы

[1] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

[2] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987 г. – 304 с.

[3] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988 г. – 328 с.

[4] Крымов Б.Г. и др. Исполнительные устройства систем управления летательных аппаратов. / Б.Г. Крымов, Л.В. Рабинович, В.Г. Стеблецов. – М.: Машиностроение, 1987 г. – 264 с.

[5] Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1976 г. – 424 с.

Чжо Линн – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawlin4939@gmail.com

Акименко Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru

Тун Тун Чжо, Гин Эй Чжо, Мьо Паинг Сат, А.М. Макаренков

СПОСОБ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Случайность параметров системы управления может оказывать существенное влияние на качество управления в статистическом смысле, например, приводить к увеличению дисперсии выходного сигнала и изменению его среднего значения. Эти эффекты в целом характерны для стохастических систем, к которым может быть отнесено большинство реальных технических систем. Причиной данных эффектов является неизбежная статистическая связь между параметрами стохастической системы и ее выходным сигналом.

В работе предлагается подход к решению задачи активной компенсации случайности физических параметров систем автоматического управления в смысле формирования такого входного сигнала, который минимизирует влияние случайности параметров системы на ее выходной сигнал.

Математическая модель электрогидравлического следящего привода (ЭГСП) в линейном приближении описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\sum_{i=0}^n a_i (d^i / dt^i) x(t) = \sum_{j=0}^m b_j (d^j / dt^j) y(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – входной сигнал (электрическое напряжение), $x(t)$ – выходной сигнал (перемещение штока поршня). Предполагается, что все или некоторые коэффициенты a_i , b_j являются случайными величинами, определяемыми как

$$a_i = m_{a_i} + \tilde{a}_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad b_j = m_{b_j} + \tilde{b}_j, \quad j = \overline{0, m}, \quad (2)$$

где m_{a_i} , m_{b_j} – математические ожидания; \tilde{a}_i , \tilde{b}_j – центрированные гауссовы случайные величины. Считается также, что система физически реализуема, то есть выполняется условие $n \geq m$, и статистическая связь между входным сигналом и случайными коэффициентами отсутствует.

Для решения поставленной задачи целесообразно перейти от непрерывной модели (1) к усредненной проекционной модели [2]. В результате проекционной аппроксимации непрерывной модели (1), выполняемой с использованием методов теории матричных операторов [1], имеем следующую проекционную модель:

$$\mathbf{C}^x = (\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}) \mathbf{C}^y, \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{A}}$ – детерминированный матричный оператор; $\tilde{\mathbf{A}}$ – стохастический матричный оператор; \mathbf{C}^x и \mathbf{C}^y – проекционные характеристики выходного сигнала x и входного сигнала y соответственно.

Матричные операторы $\bar{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ в (3) определяются следующим образом:

$$\bar{\mathbf{A}} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_x)^{-1} \bar{\mathbf{A}}_y,$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{x0} \left(\sum_{v=1}^k (-1)^v (\tilde{\mathbf{A}}_x \mathbf{A}_{x0})^v \bar{\mathbf{A}}_y + \sum_{v=0}^k (-1)^v (\tilde{\mathbf{A}}_x \mathbf{A}_{x0})^v \tilde{\mathbf{A}}_y \right),$$

где

$$\mathbf{A}_{x0} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_x)^{-1}; \bar{\mathbf{A}}_x = \sum_{i=0}^{n-1} m_{a_i} (\mathbf{P}^{n-i})^T; \bar{\mathbf{A}}_y = \sum_{j=0}^m m_{b_j} (\mathbf{P}^{n-j})^T;$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_x = \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{a}_i (\mathbf{P}^{n-i})^T; \tilde{\mathbf{A}}_y = \sum_{j=0}^m \tilde{b}_j (\mathbf{P}^{n-j})^T;$$

\mathbf{P} – матричный оператор интегрирования в базисе функций Уолша [1].

Усреднение выражения (3) позволяет получить усредненную проекционную модель, определяющую проекционные характеристики математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала как

$$\mathbf{C}^{m_x} = \mathbf{M}[(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}})] \mathbf{C}^{m_y}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = \mathbf{M}[(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}) (\mathbf{C}^{R_{yy}} + \mathbf{C}^{m_y} (\mathbf{C}^{m_y})^T) (\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}})^T] - \mathbf{C}^{m_x} (\mathbf{C}^{m_x})^T, \quad (5)$$

где $\mathbf{M}[\cdot]$ – оператор математического ожидания.

По проекционным характеристикам \mathbf{C}^{m_x} и $\mathbf{C}^{R_{xx}}$ можно приближенно восстановить функции математического ожидания $m_x(t)$ и корреляции $R_{xx}(t_1, t_2)$. При этом проекционные характеристики математического ожидания $m_y(t)$ и корреляционной функции $R_{yy}(t_1, t_2)$ входного сигнала на интервале исследования T определяются, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{m_y} = \int_0^T m_y(\tau) \Phi(\tau) d\tau; \quad \mathbf{C}^{R_{yy}} = \int_0^T \int_0^T R_{yy}(\tau_1, \tau_2) \Phi(\tau_1) \Phi^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2.$$

Из (4) и (5) следует вывод об аддитивном характере влияния фактора случайности параметров стохастической системы на статистические характеристики ее выходного сигнала, то есть:

$$\mathbf{C}^{m_x} = \mathbf{C}^{\bar{m}_x} + \mathbf{C}^{\tilde{m}_x}, \quad \mathbf{C}^{R_{xx}} = \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} + \mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}},$$

где

$$\mathbf{C}^{\bar{m}_x} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{m_y}; \quad \mathbf{C}^{\tilde{m}_x} = \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}] \mathbf{C}^{m_y}; \quad \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{R_{yy}} \bar{\mathbf{A}}^T;$$

$$\mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{C}^{R_{yy}}\mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}^T\right] + \mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}\right]\mathbf{C}^{R_{yy}}\bar{\mathbf{A}}^T + \mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{C}^{R_{yy}}\tilde{\mathbf{A}}^T\right] + \mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{C}^{m_y}\left(\mathbf{C}^{m_y}\right)^T\tilde{\mathbf{A}}^T\right] - \mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}\right]\mathbf{C}^{m_y}\left(\mathbf{C}^{m_y}\right)^T\mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}^T\right].$$

Таким образом, статистические характеристики выходного сигнала стохастической системы определяются как

$$m_x^l(t) = \Phi^T(t)\mathbf{C}^{m_x} = \Phi^T(t)\left(\mathbf{C}^{\bar{m}_x} + \mathbf{C}^{\tilde{m}_x}\right) = \bar{m}_x^l(t) + \tilde{m}_x^l(t), \quad (6)$$

$$R_{xx}^l(t_1, t_2) = \Phi^T(t_1)\mathbf{C}^{R_{xx}}\Phi(t_2) = \Phi^T(t_1)\left(\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} + \mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}}\right)\Phi(t_2) = \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) + \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2). \quad (7)$$

Далее рассмотрим способ активной компенсации, обеспечивающий приближение $m_x^l(t)$ и $R_{xx}^l(t_1, t_2)$ к $\bar{m}_x^l(t)$ и $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ соответственно.

Задача компенсации по математическому ожиданию может быть сведена к решению обратной задачи динамики в статистической постановке. Для этого введем понятие усредненного матричного оператора стохастической системы, представляющего собой матрицу математического ожидания стохастического оператора $\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}$:

$$\mathbf{m}_A = \mathbf{M}\left[\left(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}\right)\right] = \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{M}\left[\tilde{\mathbf{A}}\right].$$

Тогда, предполагая обратимость матрицы \mathbf{m}_A , можно записать следующее соотношение:

$$\mathbf{C}^{cor\ m_y} = \left(\mathbf{m}_A\right)^{-1}\mathbf{C}^{\bar{m}_x},$$

которое, является формальным в том смысле, что не позволяет решить сформулированную в таком виде обратную задачу на практике, поскольку оператор $\left(\mathbf{m}_A\right)^{-1}$ фактически является дифференциальным оператором, соответствующим физически нереализуемой системе. Обойти данную проблему можно, обратившись к понятию реального дифференцирующего звена. Данное звено описывается дифференциальным уравнением $T_D x' + x = y'$, которому соответствует проекционная модель $\mathbf{C}^x = \left(T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}\right)^{-1}\mathbf{C}^y$, где матрица $\left(T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}\right)^{-1}$ представляет собой матричный оператор реального дифференцирующего звена (реальный оператор дифференцирования).

Вычисляя матричные операторы $\bar{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ по формулам, в которых оператор интегрирования \mathbf{P} заменен оператором $\mathbf{P}^* = T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}$, можно вычислить оператор \mathbf{m}_A^* , заменяющий оператор \mathbf{m}_A в вышеприведенном формальном соотношении

$${}_{cor}m_y^l(t) = \Phi^T(t)\left(\mathbf{m}_A^*\right)^{-1}\mathbf{C}^{\bar{m}_x}. \quad (8)$$

Следующим этапом является определение корреляционной функции скорректированного входного сигнала. Из соотношения (7) видно, что для

компенсации его второго слагаемого $\tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ можно заменить $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ на функцию $\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$, то есть

$$R_{xx}^l(t_1, t_2) = \bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) + \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \approx \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2), \quad (9)$$

где скорректированную корреляционную функцию выхода эквивалентной детерминированной системы можно также определить как

$$\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = 2\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - R_{xx}^l(t_1, t_2), \quad (10)$$

то есть без необходимости отдельного вычисления $\tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$.

С целью обеспечения естественного условия положительной определенности функции $\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2)$ выражение (10) можно модифицировать следующим образом:

$$\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = k_l \left(\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - k_d \left(R_{xx}^l(t_1, t_2) - \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \right) \right), \quad (11)$$

где коэффициенты $k_l \leq 1$ и $k_d \leq 1$ определяют, уровень и глубину компенсации.

Корреляционная функция скорректированного входного сигнала может быть найдена в результате решения следующей обратной задачи для эквивалентной детерминированной системы:

$${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2) = \Phi^T(t_1) (\bar{\mathbf{A}}^*)^{-1} \mathbf{C}^{R_{\Delta}} \left((\bar{\mathbf{A}}^*)^T \right)^{-1} \Phi(t_2), \quad (12)$$

где $\mathbf{C}^{R_{\Delta}} = \int_0^{T_D} \int_0^{T_D} \bar{R}_{\Delta}^l(\tau_1, \tau_2) \Phi(\tau_1) \Phi^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2$; $\bar{\mathbf{A}}^*$ – матричный оператор, вы-

числяемый с использованием оператора интегрирования \mathbf{P}^* , как это делалось выше для матричного оператора \mathbf{m}_{Δ}^* . При этом постоянная времени T_D также выбирается достаточно малой, но такой, чтобы не нарушалось условие положительной определенности найденной функции ${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2)$.

В качестве примера рассмотрим решение задачи компенсации влияния случайности физических параметров ЭГСП виброиспытательного стенда на статистические характеристики воспроизводимого вибрационного воздействия. Проблема состоит в том, что из-за нестабильности параметров ЭГСП, обусловленной как внешними (температура окружающей среды), так и внутренними (содержание газовой фазы в рабочей жидкости) случайными факторами, имеет место искажение упомянутых статистических характеристик. Таким образом, ЭГСП следует рассматривать как стохастическую систему со всеми особенностями ее поведения.

Пусть ЭГСП описывается линеаризованной моделью (1), где $n=5$ и $m=0$. Начальные условия полагаются нулевыми. В качестве случайного параметра возьмем коэффициент вязкого трения на золотнике электрогидравлического усилителя h_3 . Данный параметр будем считать гауссовой

случайной величиной с математическим ожиданием $m_{h_3} = 0,25 \frac{H \cdot c}{M}$ и дисперсией $D_{h_3} = 0,0017 \frac{H^2 c^2}{M^2}$. При этом в уравнении (1) случайными будут коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4 , математические ожидания и дисперсии которых вычисляются через заданные m_{h_3} и D_{h_3} . На вход поступает сигнал в виде случайного процесс с математическим ожиданием $m_y(t) = 0,01 \sin 15,7t$ и корреляционной функцией $R_{yy}(t_1, t_2) = 6 \cdot 10^{-7} e^{-20|t_1 - t_2|}$. Корреляционная функция выходного сигнала $R_{xx}^l(t_1, t_2)$ представлена на рис. 1, где хорошо видны колебания дисперсии $D_x^l(t) = R_{xx}^l(t_1, t_2)|_{t_1=t_2=t}$ с двойной частотой изменения $m_y(t)$. На рисунке 2 представлена корреляционная функция выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$.

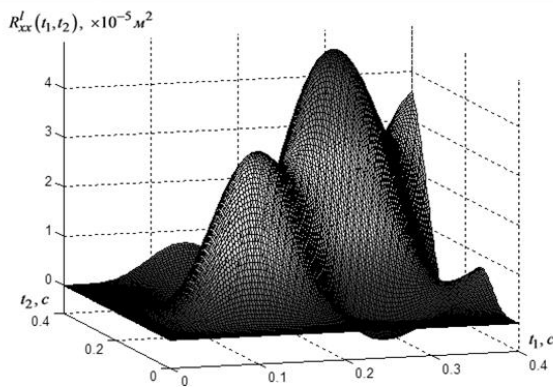


Рис. 1.

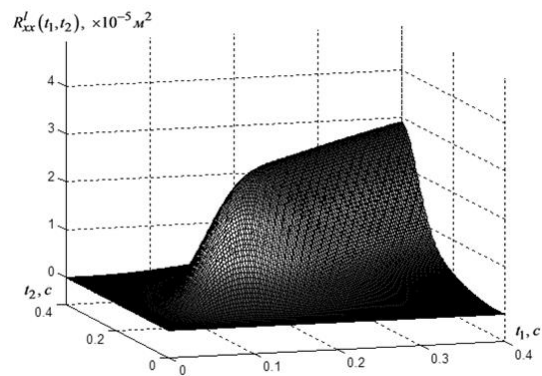


Рис. 2.

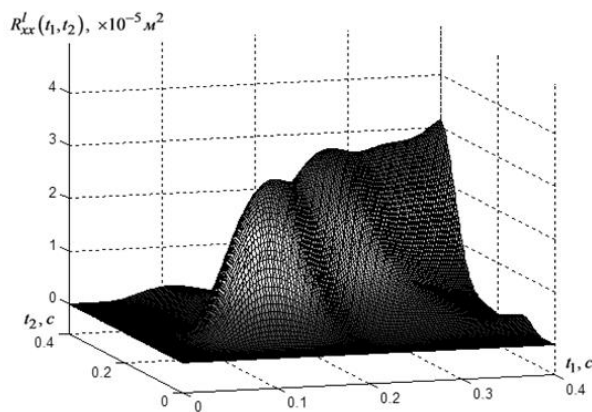


Рис. 3.

Задача активной компенсации решалась при выбранных $k_l = 0,8$, $k_d = 0,8$, $T_D = 7 \cdot 10^{-3}$. Результат представлен на рис. 3, где показана корреляционная функция выходного сигнала стохастической модели ЭГСП, вы-

численная для скорректированного входного сигнала в виде случайного процесса с найденными характеристиками ${}_{cor}m_y^l(t)$ и ${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2)$.

Таким образом, предложен новый подход к активной компенсации случайности физических параметров систем управления, идея которого следует из операторной формы их моделей. На примере активной компенсации случайности физических параметров электрогидравлического следящего привода виброиспытательного стенда показано, что можно заметно улучшить точность воспроизведения статистических характеристик формируемого вибрационного воздействия. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 16-41-400701).

Список литературы

[1] *Лапин С.В., Егунов Н.Д.* Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. – 496 с.

[2] *Пупков К.А., Егунов Н.Д., Макаренков А.М.* и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com

Мью Паинг Сат – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: myoraingsatt85@gmail.com

Макаренков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

Нгуен Ти Тхань, Ю.И. Мышляев, А.В. Финошин

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С УСТОЙЧИВОЙ НУЛЬ-ДИНАМИКОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Рассматривается задача синтеза алгоритма стабилизации линейного SISO объекта, заданного передаточной функцией, с относительной степенью больше единицы, в условиях параметрической неопределенности. Предполагается устойчивость полинома числителя передаточной функции. Представлена трехэтапная процедура синтеза. На первом этапе вводится дополнительный (информационный) выход, относительно которого преобразованный объект имеет относительную степень, равную единице, и при этом сохраняется устойчивость полинома передаточной функции. На втором этапе выполняется преобразование системы к форме с выделением устойчивой нуль-динамики [1]. На третьем этапе синтезируется алгоритм стабилизации в форме обратной связи по состоянию системы в предположении, что параметры объекта известны.

Постановка задачи. Рассмотрим линейный объект управления (ОУ) в форме передаточной функции (ПФ)

$$y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} u(s), \quad (1)$$

где $\xi = \text{col} \{a_i, b_j; i = \overline{0, n-1}, j = \overline{0, m}\}$ – вектор параметров, $\xi \in \Xi$ – множество допустимых вариантов.

Предположение. Относительная степень ОУ $\rho = n - m > 1$, $b(s) = b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0$ – гурвицевый многочлен с положительными коэффициентами при $\forall \xi \in \Xi$.

Целью управления (ЦУ) является ограниченность траекторий замкнутой системы и стабилизация объекта (1) по вектору состояния.

Методика синтеза алгоритмов стабилизации

Предлагаемая методика синтеза алгоритма стабилизации состоит из трех этапов. Первым этапом является приведение ОУ к пассивируемому виду. Вторым этапом – приведение модели ОУ к нормальной форме. На третьем этапе методом функций Ляпунова, в условиях полной априорной информации о параметрах ОУ синтезируется “идеальное” управление, обеспечивающее достижение поставленной цели управления.

Этап 1. Пассивификация

Для обеспечения пассивируемости ОУ введем дополнительный (информационный) выход, относительно которого преобразованный объект

имеет относительную степень, равную единице, и при этом сохраняется устойчивость полинома числителя ПФ.

$$y_{\text{inf}}(s) = g(s)y(s),$$

где $g(s) = g_{\rho-1}s^{\rho-1} + g_{\rho-2}s^{\rho-2} + \dots + g_0$ – гурвицевый многочлен, $g_i > 0, i = \overline{0, \rho-1}$.

Передаточная функция объекта управления по информационному выходу имеет вид

$$y_{\text{inf}}(s) = \frac{\tilde{b}(s)}{a(s)} u(s), \quad (2)$$

где $\tilde{b}(s) = b(s)g(s)$ – гурвицевый многочлен степени $n-1$.

Этап 2. Переход к нормальной форме.

Преобразуем (2) к системе уравнений в пространстве состояния

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{c}\mathbf{x} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы, $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ – вектор $1 \times n$,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix} - \text{матрица } n \times n, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} - \text{вектор } n \times 1, \text{ где}$$

$$\beta_1 = \tilde{b}_{n-1}, \quad \beta_2 = \tilde{b}_{n-2} - a_{n-1}\beta_1, \quad \beta_3 = \tilde{b}_{n-3} - a_{n-1}\beta_2 - a_{n-2}\beta_1, \quad \dots, \\ \beta_n = \tilde{b}_0 - a_{n-1}\beta_{n-1} - \dots - a_1\beta_1.$$

Приведем (3) к системе с выделением внутренней и внешней динамики. Введем в рассмотрение преобразования координат [1]

$$\begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{Z}_0\mathbf{x}, \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{H}_0\mathbf{x}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{H}_0 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ – вектор $(1 \times n)$, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n-1}$ – вектор состояния внутренней динамики, $y_{\text{inf}} \in \mathbb{R}^1$, а матрица \mathbf{Z}_0 выбирается из условий

$$\mathbf{Z}_0\mathbf{b} = 0, \quad \text{rank} \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{vmatrix} = n.$$

Дифференцируя (4), получаем линейную каскадную модель

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{b}_z y_{\text{inf}}, \\ \dot{y}_{\text{inf}} = a_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} + bu, \end{cases} \quad (5)$$

где $u \in R^1$, \mathbf{A}_z – $(n-1) \times (n-1)$ гурвицевая матрица (ввиду устойчивости многочлена \tilde{b}_s), \mathbf{b}_z – вектор $(n-1) \times 1$, $\tilde{\mathbf{a}}_z$ – $1 \times (n-1)$ вектор, a_y , $b = \beta_1 = b_m g_{\rho-1}$ – скаляры.

Исходная цель управления преобразуется к требованию ограниченности траекторий замкнутой системы и выполнению условия

$$\begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ y_{\text{inf}} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{0} \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Этап 3. Синтез идеального управления

Синтезируем алгоритм управления, обеспечивающий достижение цели управления (6) при полной априорной информации о параметрах ОУ.

В качестве кандидатуры на роль функции Ляпунова рассмотрим положительно определенную форму:

$$V_0(\mathbf{z}, y_{\text{inf}}) = Q_z + Q_y, \quad (7)$$

где $Q_z = 0,5 \mathbf{z}^T \mathbf{H}_z \mathbf{z}$, $Q_y = 0,5 y_{\text{inf}}^2$, $\mathbf{H}_z = \mathbf{H}_z^T > 0$.

Выберем алгоритм управления в форме

$$u = -b^{-1} (a_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} + \gamma y_{\text{inf}}), \quad (8)$$

где $\rho_z = \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{G}_z)}{\lambda_{\max}(\mathbf{H}_z)}$, $\mathbf{G}_z = \mathbf{G}_z^T$: $\mathbf{H}_z \mathbf{A}_z + \mathbf{A}_z^T \mathbf{H}_z = -\mathbf{G}_z$ $\gamma > 0$ – выбираемый па-

раметр, $\gamma \geq \frac{\|\mathbf{b}_z^T \mathbf{H}_z\|^2}{4\lambda_z(\rho_z - \varepsilon)} + \varepsilon + \gamma_0$, $\gamma_0 \geq 0$ – заданное число, $0 < \varepsilon < \min\{\rho_z, \gamma\}$,

$\lambda_z = \min_j \lambda_j(\mathbf{H}_z)$ – минимальное собственное число матрицы \mathbf{H}_z .

При этом справедлива оценка скорости убывания функции Ляпунова (7).

$$\dot{V}_0 \leq -2\varepsilon V_0. \quad (9)$$

Следовательно, $V_0(\mathbf{z}(t), y_{\text{inf}}(t)) \leq V_0(\mathbf{z}(0), y_{\text{inf}}(0)) e^{-2\varepsilon t}$.

Таким образом, в системе (5), (8) достигается ЦУ в предположении, что параметры ОУ известны.

Уменьшим число параметров ОУ, входящих в управление (8). Для этого продифференцируем второе уравнение системы (4)

$$\dot{y}_{\text{inf}} = \mathbf{H}_0 \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{H}_0 (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u) = x_2 + bu. \quad (10)$$

Сравнивая второе уравнение системы (5) и (10), получаем

$$\tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} + a_y y_{\text{inf}} = x_2. \quad (11)$$

Тогда с учетом (11) алгоритм управления имеет вид

$$u = -\theta_* (\gamma x_1 + x_2), \text{ где } \theta_* = b^{-1}. \quad (12)$$

Заметим, что управление (12) зависит только от одного параметра ОУ.

Пример. Модель летательного аппарата имеет передаточную функцию вида: $W(p) = \frac{b_1 p + b_0}{p(p^2 + a_1 p + a_0)}$, где a_0, a_1, b_0, b_1 – неизвестные параметры ОУ, ($b_i > 0$), $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Этап 1. Зададим информационный выход в виде $y_{\text{inf}} = (g_1 p + g_0) y$.

Этап 2. Представим модель системы в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{c}\mathbf{x}, \end{cases}$$

где $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ 0]$, $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}$.

Выберем $\mathbf{H}_0 = (1 \ 0 \ 0)$, $\mathbf{Z}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\beta_2/\beta_3 \\ -\beta_3/\beta_1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Дифференцируя (4), получаем линейную каскадную модель

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{b}_z y_{\text{inf}}, \\ \dot{y}_{\text{inf}} = a_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} + bu, \end{cases}$$

где $a_0 = 13,8125$, $a_1 = 2,5$, $b_0 = 16$, $b_1 = 10$, $g_0 = 1$, $g_1 = 0,1$,
 $\mathbf{A}_z = \begin{pmatrix} -6,1128 & 2,5988 \\ 6,75 & -5,4872 \end{pmatrix}$, $\mathbf{b}_z = \begin{pmatrix} -53,4387 \\ 112,8313 \end{pmatrix}$, $a_y = 9,1$, $\tilde{\mathbf{a}}_z = (1 \ -0,4426)$,
 $b = b_1 g_1 = 1$.

Этап 3. Выберем идеальное управление в форме (12) $u = -b^{-1}(\gamma x_1 + x_2)$, результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1-3 при $\gamma = 25$, $\varepsilon = 0,005$, $y_{\text{inf}}(0) = 0,5$, $\mathbf{z}(0) = (1 \ 1)^T$.

Как видно из рис. 1, 2, 5, задача стабилизации решена, т.е. достигнута ЦУ (6). Все траектории системы ограничены.

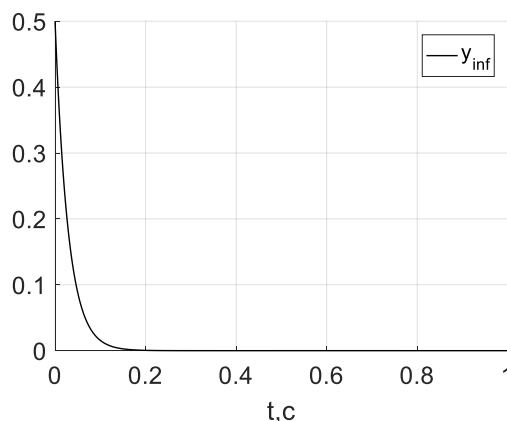


Рис 1. Информационный выход

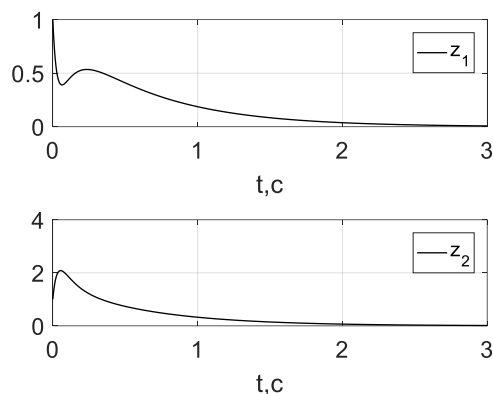


Рис 2. Фазовые переменные внутренней динамики

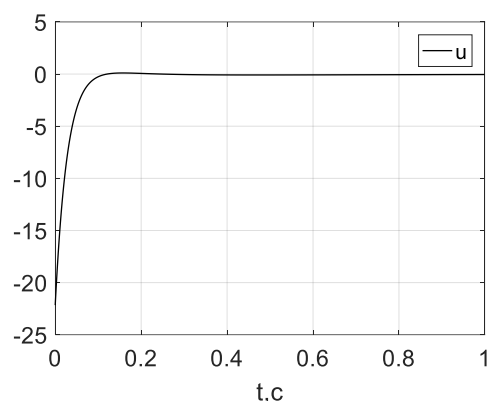


Рис 3. сигнал управления

Заключение

В работе описана методика стабилизации линейными системами с устойчивой нуль-динамикой на основе пассивации и приведения к нормальной форме. Описывается трехэтапная процедура синтеза. Приводятся оценка сходимости. Предложенная методика применена для решения задачи стабилизации за автопилотом с неизвестными параметрами. Приводится компьютерное моделирование системы управления, подтверждающее достижение заданной цели управления

Список литературы

- [1] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
 [2] Пупков К.А., Егупов Н.Д., Баркин А.И., Мышляев Ю.И. и др. «Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5-ти томах. Том 5. Методы современной теории автоматического управления», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – 784 с.

Нгуен Ти Тхань – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nct1101@gmail.com

Мышляев Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru

Фиошин Александр Викторович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: earlov@gmail.com

Нгуен Ти Тхань

УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫХОДУ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С УСТОЙЧИВОЙ НУЛЬ-ДИНАМИКОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Рассматривается методика синтеза алгоритма управления линейными объектами на основе метода функций Ляпунова, пассивации и приведения к нормальной форме с выделением внутренней и внешней динамики.

Предлагаемая методика состоит из трех этапов. На первом этапе формируется информационный выход как линейная комбинация компонентов вектора состояния для обеспечения условий пассивируемости. На втором этапе выполняется преобразование координат системы к нормальной форме. На третьем этапе синтезируется «идеальное» управление в предположении, что параметры объекта известны.

Постановка задачи. Рассмотрим линейный объект управления (ОУ) в форме передаточной функции (ПФ)

$$y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} u(s), \quad (1)$$

где $\xi = \text{col}\{a_i, b_j; i = \overline{0, n-1}, j = \overline{0, m}\}$ – вектор параметров, $\xi \in \Xi$ – множество допустимых вариантов.

Предположение. Относительная степень ОУ $\rho = n - m > 1$, $b(s) = b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0$ – гурвицевый многочлен с положительными коэффициентами при $\forall \xi \in \Xi$.

Целью управления (ЦУ) является ограниченность траекторий замкнутой системы и стабилизация объекта (1) по вектору состояния.

Методика синтеза алгоритмов стабилизации

Этап 1. Формирование информационного выхода.

Для обеспечения пассивируемости ОУ введем дополнительный (информационный) выход, относительно которого преобразованный объект имеет относительную степень, равную единице, и при этом сохраняется устойчивость полинома числителя ПФ.

$$y_{\text{inf}}(s) = g(s) y(s),$$

где $g(s) = g_{\rho-1} s^{\rho-1} + g_{\rho-2} s^{\rho-2} + \dots + g_0$ – гурвицевый многочлен, $g_i > 0, i = \overline{0, \rho-1}$.

Передаточная функция объекта управления по информационному выходу имеет вид

$$y_{\text{inf}} s = \frac{\tilde{b} s}{a s} u s, \quad (2)$$

где $\tilde{b} s = b s g s$ - гурвицевый многочлен степени $n-1$.

Этап 2. Переход к нормальной форме.

Преобразуем (2) к системе уравнений в пространстве состояния

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{c}\mathbf{x} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ - вектор состояния системы, $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ - вектор $1 \times n$,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix} - \text{матрица } n \times n, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} - \text{вектор } n \times 1,$$

где $\beta_1 = \tilde{b}_{n-1}$, $\beta_2 = \tilde{b}_{n-2} - a_{n-1}\beta_1$, $\beta_3 = \tilde{b}_{n-3} - a_{n-1}\beta_2 - a_{n-2}\beta_1$, \dots ,
 $\beta_n = \tilde{b}_0 - a_{n-1}\beta_{n-1} - \dots - a_1\beta_1$.

Приведем (3) к системе с выделением внутренней и внешней динамики. Введем в рассмотрение преобразования координат [1]

$$\begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{Z}_0\mathbf{x}, \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{H}_0\mathbf{x}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{H}_0 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ - вектор $(1 \times n)$, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n-1}$ - вектор состояния внутренней динамики, $y_{\text{inf}} \in \mathbb{R}^1$, а матрица \mathbf{Z}_0 выбирается из условий

$$\mathbf{Z}_0\mathbf{b} = 0, \quad \text{rank} \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{vmatrix} = n.$$

Дифференцируя (4), получаем линейную каскадную модель

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{b}_z y_{\text{inf}}, \\ \dot{y}_{\text{inf}} = a_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z\mathbf{z} + bu, \end{cases} \quad (5)$$

где $u \in \mathbb{R}^1$, \mathbf{A}_z - $(n-1) \times (n-1)$ гурвицевая матрица (ввиду устойчивости многочлена $\tilde{b} s$), \mathbf{b}_z - вектор $(n-1) \times 1$, $\tilde{\mathbf{a}}_z$ - $1 \times (n-1)$ вектор, a_y , $b = \beta_1 = b_m g_{\rho-1}$ - скаляры.

Исходная цель управления преобразуется к требованию ограниченности траекторий замкнутой системы и выполнению условия

$$\begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ y_{\text{inf}} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{0}, \quad \text{при } t \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Этап 3. Синтез идеального управления

Синтезируем алгоритм управления, обеспечивающий достижение цели управления (6) при полной априорной информации о параметрах ОУ.

В качестве кандидатуры на роль функции Ляпунова рассмотрим положительно определенную форму:

$$V_0(\mathbf{z}, y_{\text{inf}}) = Q_z + Q_y, \quad (7)$$

где $Q_z = 0,5\mathbf{z}^T \mathbf{H}_z \mathbf{z}$, $Q_y = 0,5y_{\text{inf}}^2$, $\mathbf{H}_z = \mathbf{H}_z^T > 0$.

Выберем алгоритм управления в форме

$$u = -b^{-1}\gamma y_{\text{inf}}, \quad (8)$$

где $\rho_z = \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{G}_z)}{\lambda_{\max}(\mathbf{H}_z)}$, $\mathbf{G}_z = \mathbf{G}_z^T: \mathbf{H}_z \mathbf{A}_z + \mathbf{A}_z^T \mathbf{H}_z = -\mathbf{G}_z$ $\gamma > 0$ – выбираемый па-

раметр, $\gamma \geq \frac{\|\tilde{\mathbf{a}}_z + \mathbf{b}_z^T \mathbf{H}_z\|^2}{4\lambda_z(\rho_z - \varepsilon)} + \varepsilon + a_y + \gamma_0$, $\gamma_0 \geq 0$ – заданное число,

$0 < \varepsilon < \min\{\rho_z, \gamma\}$, $\lambda_z = \min_j \lambda_j(\mathbf{H}_z)$ – минимальное собственное число матрицы \mathbf{H}_z .

При этом справедлива оценка скорости убывания функции Ляпунова (7).

$$\dot{V}_0 \leq -2\varepsilon V_0. \quad (9)$$

Следовательно, $V_0(\mathbf{z}(t), y_{\text{inf}}(t)) \leq V_0(\mathbf{z}(0), y_{\text{inf}}(0))e^{-2\varepsilon t}$.

Таким образом, в системе (5), (8) достигается ЦУ в предположении, что параметры ОУ известны.

Пример. Модель летательного аппарата имеет передаточную функцию вида: $W(p) = \frac{b_1 p + b_0}{p(p^2 + a_1 p + a_0)}$, где a_0, a_1, b_0, b_1 – неизвестные пара-

метры ОУ, ($b_i > 0$), $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Этап 1. Зададим информационный выход в виде $y_{\text{inf}} = (g_1 p + g_0) y$.

Этап 2. Представим модель системы в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \\ y_{\text{inf}} = \mathbf{c}\mathbf{x}, \end{cases}$$

где $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ 0]$, $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}$.

Выберем $\mathbf{H}_0 = (1 \ 0 \ 0)$, $\mathbf{Z}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\beta_2/\beta_3 \\ -\beta_3/\beta_1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Дифференцируя (4), получаем линейную каскадную модель

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{b}_z y_{\text{inf}}, \\ \dot{y}_{\text{inf}} = a_y y_{\text{inf}} + \tilde{\mathbf{a}}_z \mathbf{z} + bu, \end{cases}$$

где $a_0 = 13,8125$, $a_1 = 2,5$, $b_0 = 16$, $b_1 = 10$, $g_0 = 1$, $g_1 = 0,1$,
 $\mathbf{A}_z = \begin{pmatrix} -6,1128 & 2,5988 \\ 6,75 & -5,4872 \end{pmatrix}$, $\mathbf{b}_z = \begin{pmatrix} -53,4387 \\ 112,8313 \end{pmatrix}$, $a_y = 9,1$, $\tilde{\mathbf{a}}_z = (1 \quad -0.4426)$,
 $b = b_1 g_1 = 1$.

Этап 3. Выберем идеальное управление в форме (12) $u = -b^{-1}(\gamma x_1 + x_2)$, результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1-3 при $\gamma = 25$, $\varepsilon = 0,005$, $y_{\text{inf}}(0) = 0,5$, $\mathbf{z}(0) = (1 \quad 1)^T$.

Как видно из рис. 1, 2, 5, задача стабилизации решена, т.е. достигнута ЦУ (6). Все траектории системы ограничены.

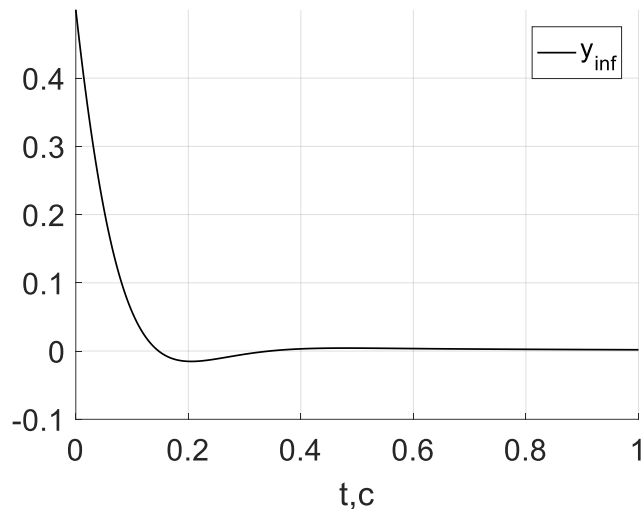


Рис 1. Информационный выход

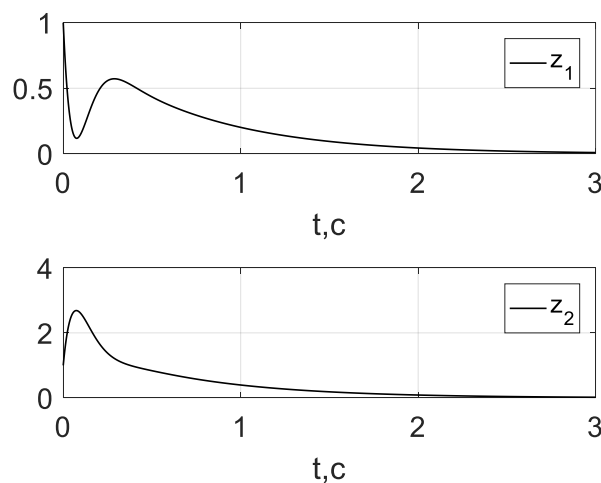


Рис 2. Фазовые переменные внутренней динамики

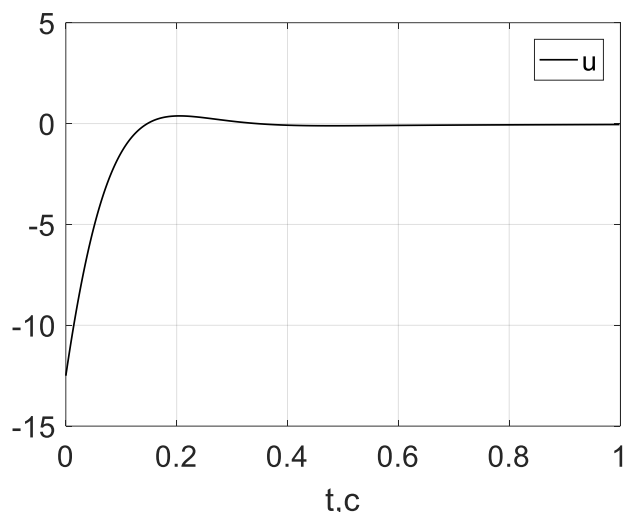


Рис 3. сигнал управления

Заключение

В работе описана методика стабилизации линейными системами с устойчивой нуль-динамикой на основе пассивации и приведения к нормальной форме. Описывается трехэтапная процедура синтеза. Приводятся оценка сходимости. Предложенная методика применена для решения задачи стабилизации за автопилотом с неизвестными параметрами. Приводится компьютерное моделирование системы управления, подтверждающее достижение заданной цели управления

Список литературы

[1] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

[2] Пупков К.А., Егупов Н.Д., Баркин А.И., Мышляев Ю.И. и др. «Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5-ти томах. Том 5. Методы современной теории автоматического управления», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – 784 с.

Нгуен Ти Тхань – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nct1101@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....

3

Барков А.В.

Анализ точности обработки на станках типа обрабатывающий центр 4

Юхимец Р.М., Бысов С.А.

Анализ требований, предъявляемых к деталям и оборудованию
в рамках методики концентрации операций
металлообработки и сборки 7

Попова Т.В., Вяткин А.Г.

Анализ факторов, влияющих на бочкообразность цилиндрических
заготовок при холодной осадке 11

Савина Ю.А.

Взаимосвязь между качественными характеристиками при обработке
конструкционных материалов на основе железа 15

Баринова Д.А., Кузнецов И.В.

Возможности оптимизации времени обслуживания рабочего места 19

Варичкин И.А.

Исследование влияния различных видов СОЖ на шероховатость
поверхности при фрезеровании 21

Крюков М.В.

Методы и средства измерения угловых размеров
тонкостенных деталей..... 25

*Говорун Т.А., Шаталов В.К., Штокал А.О., Рыков Е.В.,
Добросовестнов К.Б., Баженова О.П., Богачев В.А.*

Методы предотвращения холодной сварки контактирующих
поверхностей узлов раскрытия космических аппаратов
при длительном нахождении на целевой орбите 28

Воронин В.К.

Напряженно-деформированное состояние заготовки на начальном
этапе вытяжки деталей коробчатой формы 34

Попов В.О., Филиппова И.А.

Новые технологии в литье по выплавляемым моделям
с использованием фотополимерных и ледяных моделей 39

Седов Д.А., Филиппова И.А.

Новые перспективные области использования
электрошлакового литья 44

<i>Мкртчян А.Б.</i> Обзор методов оценок величины бочкообразности цилиндрических заготовок при холодной осадке	49
<i>Сухарева А.А.</i> Обработка цилиндрических отверстий фрезерованием.....	52
<i>Агеев Б.Н.</i> Основные положения кинематической теории формообразования поверхностей	54
<i>Кузнецов И.В., Баринова Д.А.</i> Оценка бочкообразности поковок при холодной осадке	56
<i>Лепченков А.В.</i> Факторы, определяющие шероховатость поверхности.....	58
<i>Федорова О.С.</i> Формирование эксплуатационных характеристик деталей машин с учетом наследования свойств, приобретенных на технологических операциях	60
<i>Гинсар И.Э.</i> Экспресс-анализ адгезионной прочности лакокрасочных покрытий.....	63
<i>Смирнов О.О.</i> Электронная теория поверхностной энергии твердых тел	65
СЕКЦИЯ 2. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	67
<i>Коростелкин А.С., Орлик Г.В., Орлик А.Г.</i> Исследование технологических факторов, влияющих на межкристаллитную коррозию при сварке линзового патрубка	68
<i>Козлова М.С., Зыбин И.Н.</i> Особенности остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактной наваркой проволокой и приваркой ленты	71
<i>Родин А.А., Зыбин И.Н.</i> Особенности получения покрытий газопламенным напылением	73
СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	75
<i>Чжо Зай, Прасицкий В.В.</i> Анализ применяемых конструкций термоэлектродов для натриевых разрядных ламп	76
<i>Йе Еинт Ко Ко, Твердова С.М.</i> Влияние степени контактирования частиц на сопротивление спеченной композиции	79

<i>Шмаков А.Н., Андреев В.В.</i> Исследование зарядовых явлений в МДП-структурах с термической пленкой двуокиси кремния легированной фосфором	82
<i>Демидов Е.В., Корнюхин А.А., Крылов А.В., Токаев М.А.</i> Катодно-подогревательные узлы для многолучевых рентгеновских трубок	87
<i>Тун Тун Лин</i> Кристаллографические особенности спектров магнитостатических волн	92
<i>Кондрашов П.В., Кулагин В.С., Андреев В.В.</i> Метод и установка многоуровневой токовой нагрузки для исследования и модификации МДП - структу	98
<i>Корнюхин А.А., Масленников О.Ю., Марин В.П., Токаев М.А.</i> Многоэмиттерные рентгеновские трубки и возможности их использования в перспективных медицинских системах компьютерной томографии	102
<i>Андреев В.В., Рыжов С.В.</i> Моделирование технологического процесса формирования быстродействующих диодов	107
<i>Аунг Пьей Зон, Мазин А.В.</i> Определение возможности разработки экспрессного метода контроля теплопроводности тонких пластин и его реализации на базе элементов Пельтье	111
<i>Прасицкий Г.В., Коржавый А.П.</i> Определение размера пор молибденовых каркасов, применяемых для производства молибденово-медных псевдосплаво	114
<i>Агу Е.Ю., Чухраев И.В.</i> Особенности структуры и физических свойств холодного катода.....	117
<i>Максимов В.В., Бакутина Н.Н., Кузнецова О.В., Челенко А.В.</i> Получение высокодисперсных порошков меди по гидрокарбонильной технологии и их применение в вакуумной и газоразрядной технике	120
<i>Сиркели А.И., Драч В.Е.</i> Расчет характеристик рупорной антенны СВЧ-диапазона	123
СЕКЦИЯ 4. ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ	127
<i>Митяшов А.А., Шевелев Д.В., Жинов А.А.</i> Анализ этапов развития энергетических газотурбинных установок начала XX века	128

<i>Круглова Г.А., Жинов А.А.</i> Влияние величины зазора у корня рабочих лопаток на осевое усилие, действующее на ступень турбины.....	134
<i>Ибрагимов С.В., Ильичев В.Ю.</i> Влияние конструкции лабиринтных уплотнений турбин на протечки пара.....	137
<i>Сидоров А.А., Киселев С.В.</i> Влияние различных типов охлаждения сопловых лопаток на неоднородность потока	141
<i>Голиков А.С.</i> Изготовление профилей турбинных лопаток для проведения научной и учебной экспериментальной работы.....	146
<i>Заричный А.Ф., Ильичев В.Ю.</i> Исследование механизма колебаний роторов, с оединенных жесткими муфтами.....	148
<i>Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.</i> К оценке возможного диапазона мощности микро ТЭЦ на базе микротурбины обращенной очередности процессов	152
<i>Сидоров П.М., Сидоров П.М., Шевелев Д.В.</i> Прикладная программа «Расчет теплоизоляции плоских поверхностей» для ОС семейства Window	158
<i>Гриджин Н.В., Емельянов Н.Э., Афанасов Я.В.</i> Применение аддитивных технологий для снятия характеристик центробежного компрессора	163
<i>Тарасов Е.В., Жинов А.А.</i> Совершенствование паротурбинных установок с теплообменными аппаратами смешивающего типа	168
<i>Калюжный Г.М., Жинов А.А.</i> Способы утилизация тепла выхлопных газов энергетических ГТД средней мощности	173
СЕКЦИЯ 5.	
КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ	
<i>Пью Чжо Кхаунг, Мышляев Ю.И.</i> Алгоритмы скоростного биградиента для двухкаскадных систем с желаемой спектральной динамики	180
<i>Долгов Я.А., Зюзин А.А., Корлякова М.О.</i> Геометрический подход к обнаружению фальшивых фотографий.....	186

<i>Тхан Хтайк Аунг, Чжо Свар Хейн, Макаренков А.М.</i> Использование проекционного метода для исследования электрогидравлического следящего привода со случайными параметрами.....	192
<i>Асатрян Т.А., Финошин А.В., Мышляев Ю.И.</i> Исследование применимости алгоритма обратного обхода интегратора к задаче управления одноосным вибрационным гироскопом с интегратором	197
<i>Асатрян Т.А., Нгуен Ти Тхань, Мышляев Ю.И.</i> Исследование применимости пассивации к задаче управления двухзвенным манипулятором с гибкими сочленениями.....	202
<i>Баранов Д.А., Краснощеченко В.И.</i> Определение характеристик инфракрасного датчика расстояний и перемещений Sharp для управления транспортным роботом	207
<i>Паинг Пью У, Краснощеченко В.И.</i> Определение частот и форм собственных колебаний нагруженной руки однозвенного манипулятора	210
<i>Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, Макаренков А.М.</i> Оптимизация параметров регулятора электрогидравлического сервопривода с учетом фактора случайности коэффициента сжатия рабочей жидкости.....	214
<i>Аксенов Н.В., Корнюшин Ю.П.</i> Опыт идентификации частотных характеристик электродинамического виброгенератора.....	219
<i>Потапов Д.Е., Мьо Паинг Сам, Макаренков А.М.</i> Опыт реализации параллельных алгоритмов проекционных методов моделирования стохастических систем на вычислительной платформе Grid.....	226
<i>Макаренков А.М., Филиппов Д.В., Якушев А.А.</i> Опыт решения задач идентификации и синтеза в классе стохастических нелинейных систем	230
<i>Чжо Чжо Мин, Акименко Д.А.</i> Параметрическая идентификация ЭГСП с применением параллельных вычислений	236
<i>Абдурахманов А.Ш., Корлякова М.О.</i> Подход к распознаванию профильных изображений лиц в толпе.....	240
<i>Хейн Кхант Аунг, Корлякова Мария Олеговна</i> Подход к решению задачи аппроксимации многоэкстремальной функции нейронными сетями прямого распространения.....	244

<i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Подход к решению проблемы зависимости точности распознавания областей глаз от угла наклона лица пользователя.....	248
<i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Применение фрактальных кривых для описания изображений при решении задачи классификации в нейронных сетях.....	253
<i>Боровков А.В., Трешневская В.О.</i> Проблема применения нелинейности в структуре генераторов псевдослучайных чисел	258
<i>Окар Мин, Мельников Д.В.</i> Проекционно-матричная модель турбогенератора классического исполнения как объекта регулирования	260
<i>Чжо Ту Аунг, Мельников Д.В.</i> Проекционно-матричная форма описания динамики генератора продольно–поперечного возбуждения как объекта регулирования	265
<i>Со Нэй Лин Аунг, Акименко Д.А.</i> Проекционный метод параметрической идентификации ЭГСП в классе нелинейных объектов.....	270
<i>Чжо Линн, Акименко Д.А.</i> Синтез управления на основе концепции обратных задач динамики электрогидравлическим приводом	274
<i>Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, Мьо Паинг Сат, Макаренков А.М.</i> Способ активной компенсации влияния случайности параметров электрогидравлического следящего привода.....	279
<i>Нгуен Ти Тхань, Мышляев Ю.И., Финошин А.А.</i> Стабилизация линейного объекта с устойчивой нуль - динамикой	285
<i>Нгуен Ти Тхань</i> Управление по выходу линейного объекта с устойчивой нуль - динамикой	290
СОДЕРЖАНИЕ	295

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ**

**Материалы
Региональной научно-технической конференции**

Том 1

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений.

Подписано в печать 20.04.2017.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 18,8. Усл. п. л. 17,5. Заказ № 68

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87