

Исследование процесса электроэрозионной обработки средствами виброакустической диагностики

С. Н. ГРИГОРЬЕВ, М. П. КОЗОЧКИН, С. В. ФЕДОРОВ, А. Н. ПОРВАТОВ,
А. А. ОКУНЬКОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: a.okunkova@stankin.ru

Разработаны средства диагностирования и с помощью виброакустического метода исследованы технологические параметры изделий, полученных в результате электроэрозионной обработки. Данный метод предпочтителен при невозможности доступа к рабочей зоне обработки с помощью оптических средств.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, вибродиагностика, изделия сложной формы, технологические параметры изделий.

The means of diagnostics and the technological parameters of products obtained by electroerosion machining by means of vibroacoustic method have been developed and studies. This method is most preferable at the absence of optical access to the machining working zone.

Key words: electrical discharge machining, vibrodiagnostics, complex shape products, technological parameters.

В современном мире широко используют изделия, полученные литейным методом. Наиболее распространенным является литье под давлением, осуществляемое для пластмасс, цветных металлов и других материалов в металлических пресс-формы [1—6]. Изготовление таких форм — трудоемкий и сложный процесс, который нелегко выполнить традиционными механическими методами обработки, а иногда и невозможно. С этим связано все более широкое использование процессов, основанных на электрической эрозии. При электроэрозионной обработке разряды производят периодически, импульсно, так чтобы диэлектрическая среда (деионизированная вода, эмульсии на основе минерального масла и др.) между электродами восстановила электрическую прочность. Наиболее очевидным преимуществом электроэрозионной обработки является высокая точность изготовления детали в связи с отсутствием механических нагрузок и постоянного обновления электрода-инструмента в зоне обработки. Каждая деталь может быть изготовлена по соответствующей программе любое количество раз с высокой степенью повторяемости формы. Точность на современных зарубежных электроэрозионных вырезных станках с ЧПУ может достигать $\pm(80...100)$ нм.

Из практики известно, что при обработке заготовки на электроэрозионном вырезном станке часто происходит западание непрофильного электрода-инструмента в узкие пазы (например, при выборке отверстий скругленного сечения радиусом $R = 0,25$ мм, габаритными размерами $0,5 \times 1,0$ мм и высотой реза до 200 мм). Это может привести

к потере стабильности и точности процесса обработки, короткому замыканию, заеданию и обрыву электрода-инструмента, повреждению алмазных фильер. Такие явления могут стать причиной низкого качества обработки детали, бра-

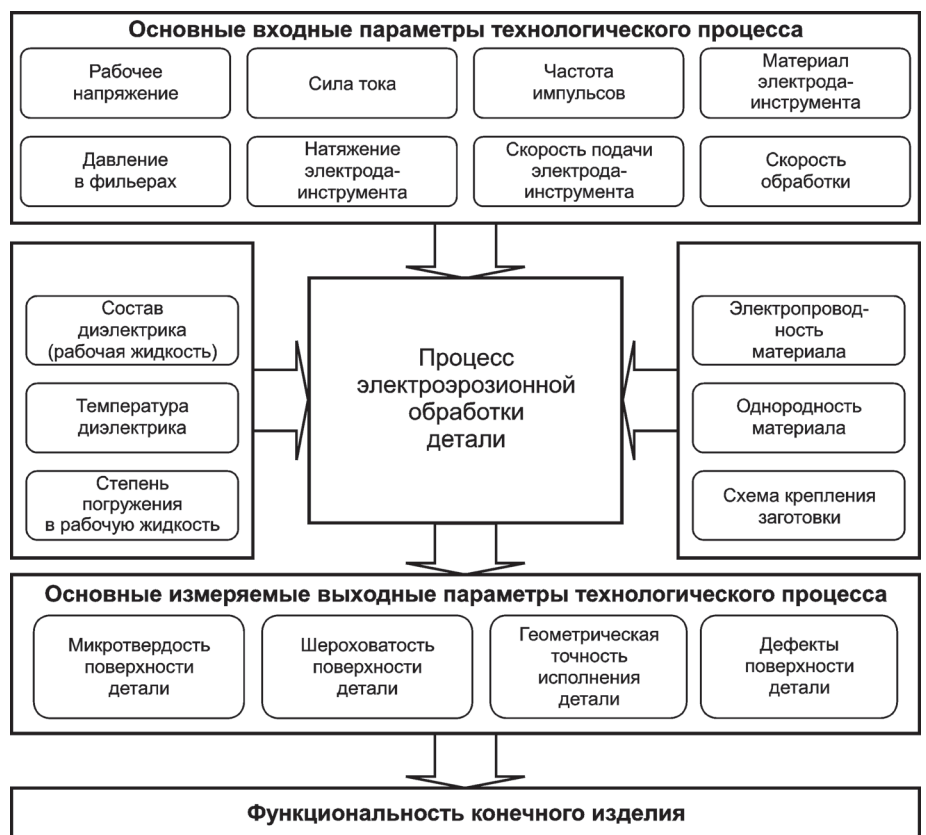


Рис. 1. Функциональные взаимосвязи входных и выходных параметров процесса электроэрозионной обработки деталей



Рис. 2. Иллюстрация физических явлений, сопровождающих технологический процесс электроэрозионного разрушения — удаления металла с поверхности детали тепловым воздействием:
МЭП — межэлектродный промежуток

ка при изготовлении конечного изделия, реже — поломок или разрушения станка.

Во время обработки крупногабаритных заготовок массой до 300 кг (при разъединении двух взаимосвязанных профилей по сложному пространственному контуру) необходимо контролировать процесс финального подреза перемычек деталей перед их разъединением, чтобы предотвратить неконтролируемый обвал внутренней детали в серединную часть электроэрозионного станка. Перед отделением заготовки или детали в процессе электроэрозионной резки изменяется звуковой сигнал, который опытный оператор определяет на слух и приостанавливает процесс обработки заблаговременно, чтобы вовремя переустановить крепления детали или использовать другие способы обеспечения контролируемого разреза заготовки и деталей.

Для повышения точности изготовления ответственных изделий прежде всего необходимо решить описанные проблемы. Главные принципы виброакустической (ВА) диагностики основаны на анализе параметров вибрации исследуемого объекта. С помощью ВА-диагностики можно искать неисправности и оценивать техническое состояние исследуемого объекта, в данном случае электрода-инструмента. На основании изложенного выше можно заключить, что исследование с помощью ВА-диагностики технологических параметров изделий, полученных в результате электроэрозионной обработки, является актуальной научно-технической задачей.

Постановка задачи. Существует порядка 16 основных входных факторов (условий), определяющих характер элект-

роэрозионных процессов, влияющих на качество изготовления детали (рис. 1) и функциональные возможности конечного изделия. Принципиальная схема физических процессов, протекающих при электроэрозионной обработке, представлена на рис. 2. Характер разрядных импульсов зависит от таких основных входных параметров обработки, как напряжение в межэлектродном промежутке, сила тока, частота и скважность импульсов тока (электроэрозионного цикла), сила натяжения электрода-инструмента и давление диэлектрика в форсунках. Известно, что эти факторы значительно влияют на стабильность процесса обработки и, как следствие, могут отражаться на характере сопровождающих вибраций. Для получения качественной информации о процессе обработки необходимо учитывать место крепления акселерометров [7—9].

Для достижения цели исследования выбраны два ключевых параметра — напряжение резания V_0 и натяжение электрода-проволоки W_t , — которые в дальнейшем варьировали для определения степени их влияния на характер вибраций в процессе электроэрозионной обработки и перед непосредственным отделением заготовки. Эти параметры изменяли в диапазонах $V_0 = 55...65$ В с шагом 5 В, $W_t = 30...40$ Н с шагом 5 Н (см. таблицу). В качестве материала заготовок применена нержавеющая сталь 12Х18Н10Т и алюминиевый сплав Д16.

План проведения эксперимента

Параметры	Сталь 12Х18Н10Т															Сплав Д16				
	Значения параметров в экспериментах																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V_0 , В	60			65			55			60			60			60	65	55	60	60
W_t , Н	35			35			35			40			30			35	35	35	40	30

Методика проведения эксперимента. Для получения сведений о характере вибраций в процессе отделения заготовки была выбрана операция электроэрозионной отрезки. Во время этой операции длинномерную заготовку (длина превышает ширину реза в 5—7 раз) располагали таким образом, что один ее конец был закреплен на рабочем столе станка, а большая часть свободно нависала над зоной обработки. Такая схема крепления характеризуется повышенными вибрациями при резании. Для проведения эксперимента использовали две заготовки размерами $200 \times 20 \times 16$ мм из разных материалов: нержавеющей стали 12Х18Н10Т (инструментальное назначение — изготовление деталей пресс-форм) и алюминиевого сплава Д16 (для оценки влияния массы изделия на характер вибраций при электроэрозионной обработке). При обработке вырезали образцы 2×20 мм и 10×20 мм без учета искрового зазора с помощью специальной программы ЧПУ.

Заготовки обрабатывали на электроэрозионном оборудовании Seibu M-500S (Япония). В качестве инструмента использовали латунную проволоку диаметром 0,25 мм. Перед окончанием отрезки, за минуту до отделения образца, фиксировали сигнал с акселерометра для дальнейшего анализа.

Виброакустический сигнал записывали двумя акселерометрами, установленными на рабочем столе для крепе-

ния заготовок и на верхней направляющей электрода-инструмента. Расположение акселерометров выбирали таким образом, чтобы контролировать вибрации инструмента и заготовки [10—12].

Габаритные размеры образцов измеряли микрометром Brown&Sharpe (Швейцария) с погрешностью 2 мкм. Образцы взвешивали на лабораторных весах METTLER TOLEDO (EL104) с диапазоном измерений 0,0001—120 г и погрешностью 0,0001 г. Снимки поверхностей экспериментальных образцов получали с помощью оптического микроскопа Olympus bx51m, оснащенного линзами коноскопической и ортоскопической проекции (увеличение 10—500 раз, окуляр 5 $\times$, 10 $\times$, 20 $\times$, 50 $\times$, галогенное освещение 12 В, рабочее расстояние 90—150 мм). Шероховатость поверхности экспериментальных образцов измеряли на профилограф-профилометре Hommel Tester (Германия), его технические характеристики: диапазон измерений 8—8000 мкм, разрешение 1—1000 нм; наименьшее отображаемое значение 0,001 мкм; погрешность измерений 2 %. Для получения изображения поверхности образцов с высоким пространственным разрешением, а также информации о составе, строении и свойствах приповерхностных слоев использовали сканирующий электронный микроскоп VEGA 3 LMN (Чешская Республика) с увеличением до 10⁶ $\times$.

Эксперимент и его результаты. Сигналы с акселерометра после усиления поступают на АЦП и записываются в памяти компьютера. Частота опроса сигналов с акселерометра составляет 20 кГц, что позволяет проводить спектральный анализ сигналов в диапазоне 0,2—10 кГц [7—11].

Заготовку позиционируют в ручном режиме: систему координат программы выставляют относительно закрепленной заготовки с помощью касания проволокой двух точек ее боковой поверхности. При нулевом расположении системы координат управляющей программы относительно заготовки электрод-инструмент отводят на 1 мм, чтобы избежать замыкания на контур и стабилизировать процесс обработки для вхождения инструмента в тело заготовки. Обработку проводят при полном заполнении ванны электроэрозионного станка с предварительной выдержкой заготовки в диэлектрике в течение 10 мин для исключения дальнейших термических колебаний ее геометрических параметров. Было обнаружено, что всплеск амплитуды колебаний, фиксируемый акселерометрами, возникает при подрезе финальных перемычек и сопровождается последующим отделением детали, что приводит к образованию дефектов на обрабатываемых поверхностях (примерно за 10 с до конца обработки). Однако масса и габаритные размеры детали могут влиять на это время. Длина записи составляла 60 с. Изменения в сигнале, поступающем с верхней направляющей, начинались за 5 с до отделения детали. ВА-сигналы обрабатывали на компьютере и представляли в виде октавных и амплитудных спектров. При проведении первичной отрезки нескольких образцов выявили, что вибрации с акселерометра на верхней направляющей симметричны, и это свидетельствует об отсутствии электрических и электромагнитных помех, в то время как сигнал с акселерометра, расположенного на рабочем столе станка, указывает на дополнительные помехи и вибрации, что нежелательно при проведении эксперимента. Здесь и далее диагностику проводили по сигналу с верхнего акселерометра.

В конце обработки наблюдали потерю стабильности процесса. В течение всего времени обработки ВА-сигнал посте-

А, усл. ед.

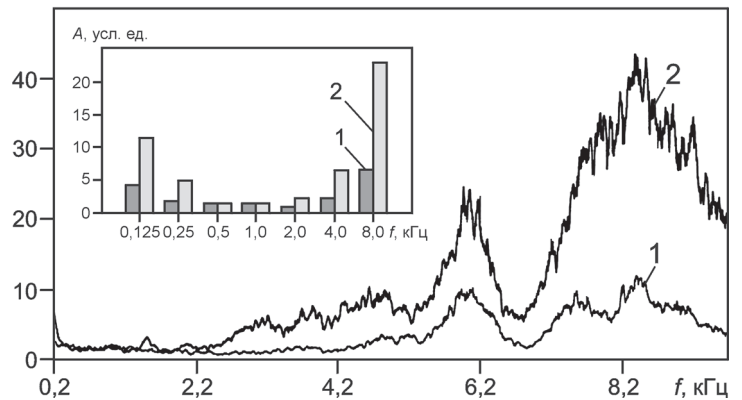


Рис. 3. Высокочастотные спектры ВА-сигналов за 30 с до конца операции (спектр 1) и на последней секунде операции (спектр 2); на врезке — октавный спектр

пенно возрастал, затем наблюдался его небольшой всплеск с последующим падением амплитуды и еще ряд всплесков перед окончательным отделением детали. Это может свидетельствовать о том, что во время обработки перемычка между отрезаемыми образцами и основной частью закрепленной заготовки постепенно уменьшалась. Следовательно, все большая часть материала нависает над зоной обработки на тонкой перемычке, подвергаясь, в том числе, пластическим деформациям под действием массы детали. Когда образец начинает вести себя описанным образом, он прижимает электрод-инструмент к основной части заготовки и возникает короткое замыкание, вызывающее прижог на примыкающих друг к другу обрабатываемых поверхностях. В этот момент процесс отделения уже необратим. Всплески сигнала в конце обработки демонстрируют механический характер разрушения при отделении образца: пластическую деформацию и хрупкое разрушение. Возникающие подвижность и перекос образца относительно заготовки вызывают серию коротких замыканий.

На рис. 3 показаны высокочастотные спектры ВА-сигналов за 30 с до конца операции (спектр 1) и на последней секунде (спектр 2). В области 8 кГц отдельные составляющие спектра на последних секундах возрастают в 4 раза. Такие изменения вполне достаточны для организации мониторинга за ходом процесса обработки и принятия мер, предотвращающих короткие замыкания. Избыточные амплитуды ВА-сигнала указывают на нестабильность искрового зазора, что грозит получением низкого качества обработанной поверхности. Это дает основания для изменения режимов обработки в сторону, способствующую уменьшению возмущающих воздействий на электрод-инструмент.

Для реализации мониторинга по амплитуде ВА-сигнала нельзя использовать его узкие частотные полосы, поскольку такой сигнал может оказаться неустойчивым при изменении условий и режимов обработки. Необходимо следить за эффективным значением амплитуды ВА-сигнала в более широком частотном диапазоне, например в октаву. Во врезке рис. 3 показаны октавные спектры ВА-сигналов за 30 с до окончания операции и на последней секунде: в октавной полосе 8 кГц эффективная амплитуда меняется более чем в 3 раза, а в полосе 4 кГц — в 2,5 раза. Такого диапазона изменения достаточно для оценки ситуации и своевременного принятия решения.

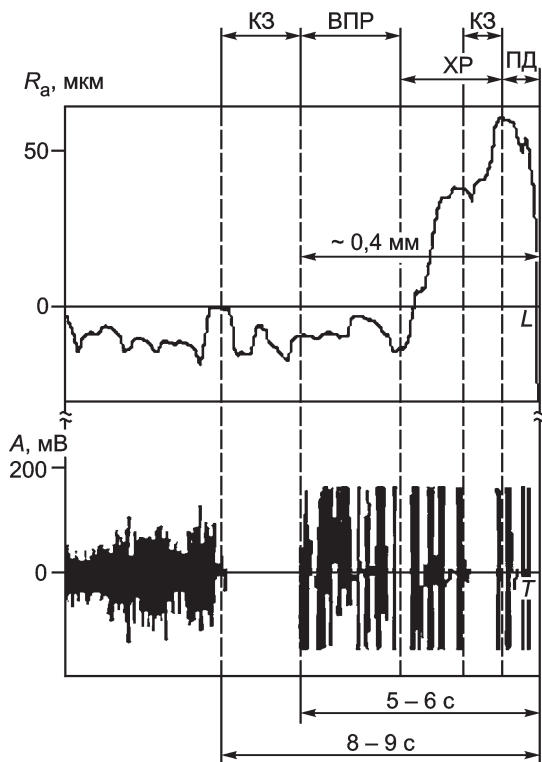


Рис. 4. Профиллограмма обработанной поверхности образца из сплава Д16 и запись ВА-сигнала за 15 с до удаления перемычки: КЗ — участки короткого замыкания при контакте электрода-инструмента с образцом; ВПР — время принятия решения; ХР, ПД — участки хрупкого разрушения образца (место скола) и пластической деформации, соответственно

После отрезания образцов измеряли искровой зазор. По результатам измерений сделаны выводы о наиболее подходящих технологических параметрах для электроэрозионной финишной обработки образцов, которые способствовали бы минимальной потере материала, минимальному искровому технологическому зазору и высокому качеству обработанной поверхности изделия за один-единственный проход, что должно положительно отразиться в итоге на геометрической точности изделия. Для стали 12Х18Н10Т минимальный искровой зазор равен 170 мкм, для сплава Д16 — 196 мкм.

Записи ВА-сигналов сопоставляли с результатами взвешивания образцов и профиллограммой шероховатости обработанных поверхностей.

При регистрации ВА-сигнала за 5 с до отделения деталей из нержавеющей стали массой 24,5 и 4,28 г у более тяжелой детали наблюдается большее на 12—15 % увеличение СКЗ амплитуды вибраций на частотах 8 кГц по сравнению с деталью меньшей массы. Это связано с тем, что момент начала деформации перемычки во многом определяется массой отделяемой детали. При обработке сплава Д16 подобная тенденция отсутствует.

На профиллографе-профилометре измеряли параметр шероховатости R_a [12]. Щуп следовал от середины поверхности среза детали по ходу движения электрода-инструмента. Сопоставление профиллограмм с записями ВА-сигнала по-

казало, что падение амплитуды вибраций на участках, отделенных от края детали более чем на 0,15—0,18 мм, вызываемое остановками движения электрода-инструмента из-за коротких замыканий, не оставляет на поверхности следов деформаций пластического или хрупкого характера. При дальнейшем продвижении электрода-инструмента характер сигнала меняется: амплитуда возрастает, но сигнал становится прерывистым, что косвенно может свидетельствовать о начале процесса механического разрушения перемычки, так как на профиллограмме наблюдаются участки пластической деформации и хрупкого разрушения (рис. 4). Для наглядности выбрана поверхность сплава Д16, где ярче выражен участок пластической деформации образца перед сколом. Из полученных результатов можно сделать выводы о возможности ВА-диагностики процесса электроэрозионной обработки в оперативном режиме с автоматическим регулированием технологических параметров обработки (время принятия решения в этом случае составит 2—4 с для образцов массой 2,0—25,0 г), уменьшая их значения или останавливая подачу инструмента в момент увеличения амплитуды ВА-сигнала.

Для исследования экспериментальных образцов на дефекты у обработанных электроэрозией поверхностей их фотографировали на оптическом микроскопе. На снимках были определены два вида дефектов поверхности, произошедших от механического (сколы, заусенцы) и теплового (прижоги, риски) воздействий [13, 14]. Дополнительно обработанные поверхности образцов фотографировали на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN. На снимках поверхность оплавлена и представляет наложение застывших капель расплава от воздействия разрядного тока в процессе обработки. На поверхности детали из сплава Д16 наблюдали множественные пластичные сколы вязкого характера. Исследования химического состава поперечного среза образцов показали, что на расстоянии до 4 мкм от поверхности после электроэрозионной обработки наблюдается обеднение материала заготовки [15, 16]. Присутствие меди и цинка в приповерхностном слое объясняется составом материала электрода-инструмента (латунь).

Выводы. Для решения научно-технической задачи, связанной с исследованиями технологических параметров изделий, получаемых при электроэрозионной обработке, была разработана информационно-измерительная система ВА-диагностирования технологического процесса. Система включает акселерометры и аппаратные средства, устанавливаемые на технологическое оборудование с ЧПУ. Предварительные экспериментальные исследования показали, что ВА-диагностика информативно отображает характер физических явлений, протекающих в зоне обработки между электродом-инструментом и заготовкой. Выявлены частотные диапазоны сигналов, наиболее информативные для ведения мониторинга технологического процесса, определены лимиты времени для принятия решений и формирования управляющего воздействия на технологические режимы работы оборудования [13]. Полученные результаты можно использовать для ответственных изделий инструментального назначения, чтобы снизить негативные факторы, сопровождающие электроэрозионную обработку.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (гос. задание № 9.1188.2014К) и в рамках гранта Президента России по государственной поддержке молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-5591.2015.8).

Литература

1. **Артес А. Э.** Развитие кузнечно-прессового производства в отечественном машиностроении // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 2. С. 6—12.
2. **Пономарев А. С., Сосенушкин Е. Н., Артес А. Э., Климов В. Н.** Влияние обработки давлением на микроструктуру и качество изделий из высокопрочного чугуна // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 3. С. 115—120.
3. **Окунькова А. А.** Проектирование и изготовление формообразующих деталей пресс-форм при помощи интегрированных cad/cam-систем (на примере использования pro/engineer) // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 3. С. 56—60.
4. **Окунькова А. А.** Комплекс контроля геометрических параметров продукции термопластавтомата: разработка структурной схемы // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 2. С. 75—79.
5. **Окунькова А. А.** Автоматизация технологической подготовки производства деталей пресс-форм на оборудовании с чпу методом электроэрозионной проволоочной обработки // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2008. № 4. С. 76—81.
6. **Артес А. Э., Сосенушкин Е. Н., Третьюхин В. В., Окунькова А. А., Гуреева Т. В.** Новые ресурсо- и энергосберегающие технологии изготовления деталей обработкой давлением // Вестник машиностроения. 2013. № 5. С. 72—74.
7. **Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С.** Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—34.
8. **Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Снопальников В. А.** Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 4. С. 27—36.

9. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Оперативная диагностика при металлообработке — проблемы и задачи // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2008. № 3. С. 14—18.
10. **Козочкин М. П., Порватов А. Н., Сабиров Ф. С.** Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 29—32.
11. **Grigoriev S. N., Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Kutin A. A.** Diagnostic systems as basis for technological improvement // Proc. CIRP. 2012. V. 1. P. 599—604.
12. **ГОСТ 2789—73.** Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
13. **Демин В. А., Еськова И. А., Николаев А. Б., Окунькова А. А., Приходько М. В.** Программно-моделирующий комплекс создания аналитико-имитационных моделей для поддержки жизненного цикла дорожно-строительной техники // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 1 (28). С. 75—80.
14. **Díaz L. A., Torrecillas R., Montes-Morán M. A., Peretyagin P. Y., Vladimirov Y. G., Okunkova A. A., Moya J. S.** Zirconia-alumina-nanodiamond composites with gemological properties // J. Nanopart. Res. 2014. V. 16. N. 2. P. 2257.
15. **Gutierrez-Gonzalez C. F., Fernandez-Garcia E., Fernandez A., Torrecillas R., Lopez-Esteban S.** Processing, spark plasma sintering, and mechanical behavior of alumina/titanium composites // J. Mater. Sci. 2014. V. 49. N. 10. P. 3823—3830.
16. **López-Esteban S., Bartolomé J. F., Esteban-Tejeda L., Moya J. S., Díaz L. A., Prado C., López-Piriz R., Torrecillas R.** Mechanical performance of a biocompatible biocide soda-lime glassceramic // J. Mech. Behaviour Biomed. Mater. 2014. V. 34. P. 302—312.

Дата принятия 27.05.2015 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

537.87:621.371

Локационные измерения и их погрешности

С. Н. ГУЗЕВИЧ

Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт,
С.-Петербург, Россия, e-mail: Guzevich@yandex.ru

Рассмотрена систематическая погрешность локационных измерений, связанная с временем прохождения сигнала. Показано, что расстояния до объектов зависят от углов их обзора, а временная зависимость является опосредованной. Локационные измерения выполнены в проективной системе координат, применение в которой одного измерительного прибора приводит к появлению двух измерительных зон и систематической погрешности.

Ключевые слова: локация, зрение, детерминированность, проективная система координат, отображение, образ, луч, проекция.

The systematic error of radar measurements associated with the measurement of signal transit time is considered. It is shown that the distance to objects depends on the survey angle and the time dependence is mediate. The location measurements are performed in projective coordinate in which the application of one measuring instrument brings to appearance of two measuring zones and systematic errors.

Key words: location, vision, determinacy, projective coordinate system, mapping, image, beam, projection.

Локация является одним из средств получения информации об окружающем пространстве и используется для определения местоположения и размеров объектов. Лока-

торы — устройства, обеспечивающие выполнение косвенных измерений линейных размеров и положения объекта, находящегося на расстоянии от них. Локацию можно прово-