

На правах рукописи



ФИЛИППОВА Екатерина Вячеславовна

ТЕСТИРОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Тула, 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: АКИМЕНКО Татьяна Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: РУМЯНЦЕВ Владимир Львович,
доктор технических наук, профессор,
Акционерное общество Центральное
конструкторское бюро аппаратостроения, г. Тула,
начальник отдела

ГОРШКОВ Алексей Анатольевич,
кандидат технических наук, Академия ФСО
России, г. Орёл, сотрудник

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени
В.Ф.Уткина», г. Рязань

Защита состоится « 5 » июня 2024 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.417.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет» по адресу: 300012, Тула, пр. Ленина, д. 92, 12-
105

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет» по адресу 300012, Тула, пр. Ленина, д. 92 и на
сайте: https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Filippova_EV/

Автореферат разослан « 04 » апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова Марина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Системы наблюдения сцен в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра достаточно широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, электроэнергетике, металлургии, химической промышленности, оборонной сфере, в системах экологического мониторинга и т.п. Основной задачей подобных систем является формирование модели наблюдаемой сцены, максимально близкой к оригиналу. Модель сцены включает ряд информативных параметров, каждый из которых передается соответствующим узлом/блоком тепловизионной системы наблюдения и вносит свой вклад в общий объем информации, формируемой устройством. Наблюдение сцены в ИК диапазоне сопровождается потерями информации, связанными с ее преобразованиями на аппаратном уровне тепловизионной системой наблюдения. Указанные потери являются безвозвратными, и не могут быть скомпенсированы при цифровой обработке электронных образов наблюдаемых сцен, поэтому важным этапом при вводе в эксплуатацию тепловизионной системы является этап тестирования и наладки, успешное прохождение которого гарантирует, что потери информации при наблюдении не превысят заданных показателей. Для проверки информативных параметров тепловизионной системы наблюдения применяются эталонные сцены, содержащие объекты, каждый из которых направлен на контроль одного из параметров тепловизионной системы, а именно: тепло-сигнальной характеристики, разрешающей способности в ИК диапазоне спектра и дисторсии. Задачей аппаратно-программного комплекса обработки информации является сравнение образа сцены, формируемого на выходе тепловизионной системы с эталонным образом, полученным в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, с реальным образом, формируемым тестируемой тепловизионной системой.

Это, в свою очередь, предъявляет высокие требования к эталонным сценам, наблюдаемым тестируемой тепловизионной системой наблюдения и программным средствам обработки тепловизионных образов, формируемых этой системой. С одной стороны, для каждого типа контроля должен формироваться эталонный сигнал с predeterminedенными и достаточно высокими параметрами, соответствующими проводимому типу контроля, а с другой стороны, выявление отклонений параметров модели сцены от параметров образа, формируемых идеальным сканером должно производиться за приемлемое время. Поэтому создание комплексного устройства генерации тестовых сигналов и программного обеспечения, позволяющего на основании обработки образа наблюдаемой тепловизионной системой тепловой сцены определить параметры системы и классифицировать ее по принципу «годен/негоден» является актуальной задачей.

Все вышеперечисленное, а именно потребности в создании универсального устройства тестирования тепловизионных систем наблюдения, обеспечивающего оценку критериев качества теплового изображения, а также

технические параметры и характеристики аппаратуры объясняет необходимость и актуальность исследований, проведенных в диссертации.

Объектом исследования данной работы является аппаратно-программный комплекс управления генерацией эталонных тестовых сигналов и обработки цифровых образов эталонных сцен, формируемых генератором и наблюдаемых тепловизионной системой наблюдения.

Предметом исследования является потери информации на разных этапах формирования цифрового образа эталонных сцен и методы их идентификации.

Цель диссертации – повышение эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения за счет создания аппаратно-программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой.

В соответствии с поставленной целью автором решены следующие задачи:

1) Построение модели преобразования наблюдаемой тепловой сцены в цифровой образ с разделением по этапам преобразования.

2) Разработка требований к элементам генератора эталонных образов сцен, используемым для контроля потерь информации на отдельных этапах преобразования.

3) Разработка методов выявления потерь информации вследствие неидеальности тепло-сигнальной характеристики, наличия дисторсии и ограниченности разрешающей способности тестируемой тепловизионной системы наблюдения.

4) Разработка обобщенной структуры генератора тепловых сцен, и требований к программному обеспечению по управлению процессом тестирования.

5) Разработка программного обеспечения обработки цифровых образов сцен и контроля параметров тестируемой системы.

6) Проведение экспериментальных исследований по верификации аппаратной части генератора эталонных сигналов и программного обеспечения;

Методы исследования. Проведенные исследования основаны на известных теориях и методиках, а именно: теория систем, теории подобия, теории теплового излучения, геометрической оптики, методы статистической обработки изображений. В основу работы положены достижения исследователей, работающих над аналогичными задачами: Дорффмана А. Ш., Кирпичева М. В., Дульнева Г. Н., Тарасова В. В., Якушенкова Ю. Г.

На защиту выносятся следующие положения, обладающие **научной новизной**:

1) Создание метода синтеза генератора эталонных тепловых сцен, отличающегося тем, что каждая генерируемая сцена предназначена для контроля потерь информации на соответствующем этапе преобразования, что позволяет повысить качество тестирования.

2) Предложена структура генератора эталонных сцен, обеспечивающего формирование образов для оценки тепло-сигнальной характеристики, дисторсии, контраста, отличающегося от известных тем, что содержит контроллер управления генерацией эталонных сцен и обработкой их цифровых образов, что позволяет сократить время и повысить качество тестирования.

3) Разработана методика и программа оценки параметров тестируемой тепловизионной системы на основании обработки сформированных ею цифровых моделей эталонных сцен, отличающаяся от известной тем, что из отдельных показателей качества формируется интегральный показатель, по которому оценивается система в целом, и выдается заключение о пригодности ее к дальнейшей эксплуатации.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

4. Разработка методов и алгоритмов системного анализа, ... принятия решений, обработки информации

12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

17. Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование ... сложных систем.

Практическая ценность работы заключается в том, что методы, научные и технические решения, полученные в диссертации, могут быть использованы в инженерной практике разработки тестирующих систем тепловизионных средств наблюдения различного назначения без дополнительных затрат на проведение их натурных испытаний.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, а также экспериментальными исследованиями программно-аппаратного комплекса тестирования тепловизионных систем наблюдения.

Реализация и внедрение результатов. Предложенные в диссертации метод и средства тестирования тепловизионных систем наблюдения внедрены на ПАО «НПО «Стрела», а также в учебный процесс кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: 7th International Conference, FDM 2018, Lozenetz, Bulgaria, June 11-16; НПК «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта», (II - 2020 г., III – 2021 г., IV – 2022 г.); НПК профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2019 - 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 работы, основные из которых включены в список литературы, в том числе: 20 статей в сборниках, рекомендуемых ВАК РФ; 5 статей в межвузовском сборнике; 3 статьи, представляющие собой материалы всероссийских научно-технических конференций; 1 статья, входящая в Scopus; 2 патента на полезную модель; 1

свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 57 рисунков, 3 таблицы, список использованной литературы из 138 наименований и приложений. Объем основного текста диссертации 140 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность выбора темы диссертационной работы, охарактеризован объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, дано краткое изложение результатов по основным разделам.

В первом разделе проведен системный анализ известных вариантов структур тепловизионных систем наблюдения, а также методов и программно-технических средств контроля их параметров.

Разработана обобщенная структура тепловизионной системы наблюдения, как объекта тестирования, включающая в себя: сканирующую систему; инфракрасный детектор, объектив O , которого фокусирует генерированный поток излучения $\Phi(x, y, z, \lambda)$ пространственной картины $Q(x, y, z, \lambda)$; инфракрасный датчик, с помощью которого распределенная функция облученности $E(Y, Z, \lambda)$ преобразуется в электрический сигнал, который вырабатывает напряжение $U(Y, Z, \lambda)$, и одновременно преобразует пространственное распределение облученности в дискретный сигнал $U(t)$; преобразователь, который после аналого-цифрового преобразования вводит $U(t)$ в виде последовательности цифровых кодов $D(t)$ через контроллер ввода данных в ЭВМ, после чего на мониторе ТСН мы видим значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения ТСН, отображённые согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

Определены этапы прохождения сигнала через блоки сканирующей системы, потери, вносимые элементами тестируемой системы на каждом этапе и задачи, решаемые тестирующей системой по идентификации потерь информации при формировании цифрового образа сцен (рис. 1). Показано, что во время преобразования каждый элемент функциональной схемы вносит искажения в преобразуемый сигнал, что приводит к потерям информации, и в конечном итоге изменяет первичный тепловой образ сцены.

Первым уровнем потерь является оптико-механический уровень $f_o(y, z)$, при прохождении через который происходит искажение теплового потока (дисторсия, виньетирование, боковые помехи от деталей оптической системы, эффект Нарцисса). Вторым уровнем потерь представляется приемником-преобразователем теплового сигнала $f_d(Y, Z)$, при прохождении через который наряду с погрешностями, связанными с конечными размерами дискретизирующих элементов и наличием кружка Эри объектива, возникают погрешности, связанные с неравномерностью статической тепло-сигнальной передаточной характеристики по площади приемника-преобразователя.

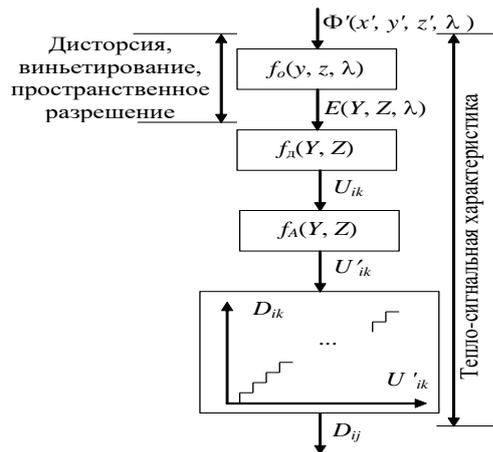


Рис. 1. Последовательность потерь информации в узлах и блоках тепловизионной системы наблюдения

При механическом сканировании в непрерывном, а не старт-стопном режиме возникают потери, в виде «смаза» изображения за счет динамики протекающих механических процессов. Ухудшение пространственно-частотных характеристик сигнала возникают по той координате, по которой осуществляется механическое сканирование.

Аналого-цифровой преобразователь вносит шум преобразования, определяемый нелинейной характеристикой $D_{jk}(U_{jk})$. Возникают потери, связанные с настройкой нижнего и верхнего порогов преобразования.

Проведен системный анализ существующих тестирующих систем в области тепловидения, телевидения, микрофильмирования, фотографии, который показал достоинства и выявил недостатки при их использовании - каждая из которых направлена на контроль одного из параметров тепловизионной системы. Показано, что генератор эталонных сигналов в области видимого спектра может работать как на отражение, так и на излучение света. Генератор эталонных тепловизионных сигналов должен работать только на излучение, что делает задачу создания эталонных сцен технически сложной.

Предложен метод синтеза генератора эталонных тепловых сцен, состоящий из этапов определения узлов и блоков, последовательно преобразующих информацию в тепловизионной системе наблюдения, построении моделей преобразования информации эталонной и реальной системой и формирования такого эталонного сигнала, который бы упрощал обработку цифрового образа.

Поставлена задача исследования информационных процессов в тепловизионных системах наблюдения с целью создания генератора эталонных сцен для контроля потерь информации, вносимых узлами и блоками системы.

Во втором разделе построены модели генераторов эталонных сцен и тепловизионной системы наблюдения, осуществляющей преобразование эталонной сцены в цифровой сигнал.

При исследовании распространения теплового излучения принято, что источник излучения представляет собой абсолютно черное тело в виде плоской излучающей поверхности, которая описывается уравнением $\Omega(x', y', z') = 0$.

Модель теплового излучения источника приведена на рис. 2, где K -излучающая точка, x', y', z' - координаты системы координат, связанной с источником; Ω - некоторая скалярная функция. Излучающая поверхность ограничена линией пересечения с поверхностью $\zeta_n(x', y', z') \leq 0$. В точке k , принадлежащей поверхности приемника теплового излучения, полезная облученность складывается из облучённостей, создаваемых всеми элементарными источниками:

$$E_1(0, y_k, z_k, \lambda) = \sum_{n=1}^N \kappa_{1n} \int_{\substack{\hat{\Omega}_n(x, y, z)=0, \\ \hat{\zeta}_n(x, y, z) < 0}} \iota_n[x, y, z, \alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k), \lambda] dx dy dz,$$

где $\iota_n[x, y, z, \alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k), \lambda]$ - индикатриса интенсивности излучения n -го источника из точки с координатами x, y, z в направлении угла $\alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k)$ между нормалью к поверхности в указанной точке и лучом, направленным в точку k ; κ - коэффициент пропорциональности.

Модель излучения положена в основу формирования структур эталонных генераторов тепловых сцен.

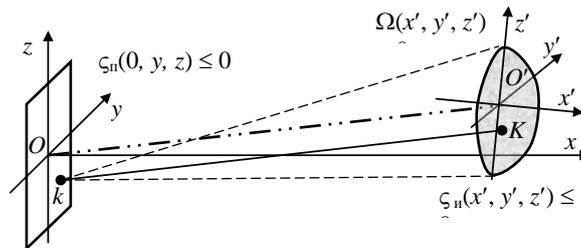


Рис. 2. Модель теплового излучения

Отмечено, что при взаимодействии со средой тепловое излучение подвергается поглощению и рассеянию, которое зависит от соотношения между длиной волны излучения и размером рассеивающих частиц, а также от концентрации частиц и их комплексного показателя преломления.

В результате исследования формирования теплового цифрового образа сцены тепловизионной системой наблюдения определено, что качество формируемого тепловизионной системой сигнала в значительной мере определяется облученностью плоскости расположения чувствительных элементов тепловизионной системы.

Следовательно, облученность чувствительного элемента в точке, удаленной от главной оптической оси, определяется по зависимости:

$E_1 = E_0 \cos^4 \varphi$, где E_0 – облученность в центре; E_1 - облученность на периферии. Данный процесс приводит к неравномерности изображения тепловой картины наблюдаемой сцены от центра к краям.

Далее при исследовании формирования теплового цифрового образа сцены тепловизионной системой наблюдения определено наличие искажений, вносимых дисторсией. В системе с дисторсией происходит отклонение теплового луча при прохождении через объектив, что приводит к смещению проекции точки K в точку k' . Δ – определяет величину дисторсии. Если $\Delta > 0$,

изображение вытягивается к краям поля и дисторсию называют подушкообразной. Если $\Delta < 0$, увеличение становится меньше к краям поля и дисторсию называют бочкообразной.

В результате исследования пространственной динамики теплового сигнала установлена её зависимость от пространственно-частотной характеристики. Перепад облученности, представленный на рис. 3, (динамический диапазон) чувствительной ячейки может приводить к потерям информации.

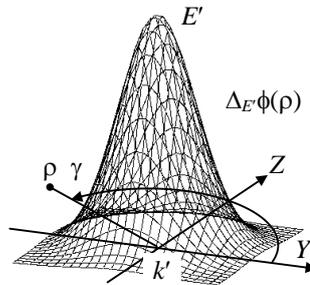


Рис. 3. Изображение точки в плоскости расположения приемника теплового излучения

Тепловой образ k' точки k в идеале можно представить в виде δ -функции Дирака $\hat{w}_\delta(\rho) = \Delta_{E'} \cdot \delta(\rho)$, где $\Delta_{E'}$ - перепад облученности (динамический диапазон) в точке k' и ее окрестностях; $\delta(\rho)$ - δ -функция Дирака, где ρ и γ - линейная и угловая координаты полярной системы координат с центром в точке k' , имеет вид:

$$\delta(\rho) = \begin{cases} \infty & \text{при } \rho = 0, 0 \leq \gamma \leq 2\pi; \\ 0 & \text{при } \rho > 0, 0 \leq \gamma \leq 2\pi; \end{cases}$$

В реальности тепловой образ точки определяется кружком рассеяния объектива, который, определяется такими параметрами, как глубина резкости δ_f и относительное отверстие $\frac{2o}{f}$ объектива. Диаметр кружка рассеяния 2σ

определяется по зависимости $2\sigma = \frac{\delta_f f}{2o}$, и является паспортной

характеристикой объектива. Отношение $\frac{\hat{w}_\delta(\rho)}{\Delta_{E'}} = w_\delta(\rho) = \delta(\rho)$

представляет собой идеальный двумерный пространственный импульсный отклик фильтра, нормированный по объему, поскольку для δ -функции

выполняется условие: $\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \delta(\rho) d\gamma d\rho = 1$.

Для кружка рассеяния может быть построена модель пространственного импульсного отклика, нормированного по объему в виде гауссиана (изображения кружка рассеяния с размытыми границами).

$$w_G(\rho, \gamma) = \frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2b_G^2}\right) = \frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + Z^2}{2b_G^2}\right) = w_G(Y, Z).$$

На основании системного анализа известных вариантов структур тепловизионных систем наблюдения, описанного в первом разделе диссертации, в качестве тестируемой принята тепловизионная система наблюдения с матричным термоэлектронным преобразователем болометрического типа. Схема матрицы такого типа представлена на рис. 4.

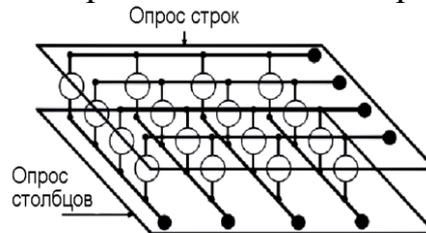


Рис. 4. Схема подключения микроболометров

Качество преобразования теплового излучения в системах подобного типа определяется в зависимости от таких параметров, как чувствительность пикселя R_v , температурный коэффициент сопротивления (α) и теплопроводность G : $R_v = \frac{I_b \alpha R \eta}{G(1 + \omega^2)}$, где I_b - ток смещения через пиксель, синусоидально модулированная угловая частота ω , падающей на чувствительную область.

В результате определенных в данной главе характеристик распространения теплового излучения, закономерностей образования искажений различного типа поставлена задача исследования и разработки методики оценки для каждого случая следующих информативных параметров: тепло-сигнальной характеристики, дисторсии, разрешающей способности тепловизионной системы наблюдения.

В третьем разделе исследованы доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала, произведена оценка таких характеристик тепловизионной системы наблюдения, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика). Определены требования к эталонным сценам, формируемым генератором эталонных сигналов.

Концепция оценки потерь информации при преобразовании теплового сигнала узлами и блоками тепловизионной системы наблюдения, основана на изменении оценки энтропии информативного параметра на входах и выходах блоков, осуществляющих его физическое и/или виртуальное преобразование, что представлено на рис. 5.

Энтропия участка, расположенного под углом 45° ($\pi/4$): $H_{\pi/4} = -\sum_i p_i \log p_i$, где p_i - вероятность попадания информативного параметра X в интервал значений $X_i \leq X < X_{i+1}$. Это означает, что система без потерь информации (рис. 5а).

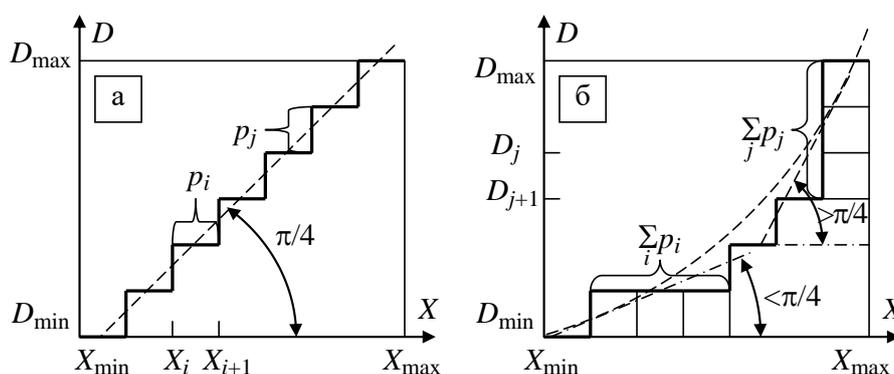


Рис. 5. Преобразование информативных параметров

X - информативный параметр; D - цифровое значение информативного параметра.

Энтропия участка, расположенного под углом $<45^\circ$ ($<\pi/4$):

$$H_{<\pi/4} = -\left(\sum_i p_i\right) \log\left(\sum_i p_i\right), \text{ где } \sum_i p_i - \text{сумма вероятностей попадания}$$

информативного параметра X в соседние участки, которые преобразуются в один и тот же код.

$$\begin{aligned} \text{Разность } H_{\pi/4} - H_{<\pi/4} &= -\sum_i p_i \log p_i + \left(\sum_i p_i\right) \log\left(\sum_i p_i\right) = \\ &= \sum_i p_i \left[-\log p_i + \log\left(\sum_j p_j\right) \right] = \sum_i p_i \log\left(\frac{\sum_j p_j}{p_i}\right) > 0. \end{aligned}$$

Это означает, что $H_{\pi/4} > H_{<\pi/4}$, т.е. в системе имеются потери информации (рис. 5б).

Энтропия участка, расположенного под углом $>45^\circ$ ($>\pi/4$): в этом случае $\sum_j p_j = p_i$, т.е. на один и тот же интервал информативного параметра j

приходится несколько интервалов цифрового кода, его представляющего. Энтропия в этом случае равна $H_{>\pi/4} = -\tilde{p}_i \log \tilde{p}_i$, где \tilde{p}_i - вероятность попадания информативного параметра в интервал, на который приходится несколько интервалов цифрового кода.

Это, в свою очередь, означает, что общее количество цифровых кодов, представляющих информативный параметр, уменьшается, а, следовательно, $H_{\pi/4} > H_{>\pi/4}$, т.е. в системе также имеются потери информации (рис. 5б).

При реальной работе термоэлектронного преобразователя, усилителя, цифро-аналогового преобразователя возникают потери информации (см. рис. 1), связанные с неидеальностью статической передаточной тепло-сигнальной характеристики (см. рис. 5). Данные потери вызывают такие искажения как виньетирование и разные значения температуры в центре кадра и по краям (рис. 6). Для выявления и идентификации подобных случаев предложено включить в генератор тестовых сигналов плоский площадной объект, располагаемый

ортогонально главной оптической оси пары «объектив/термоэлектронный преобразователь», и генерирующий тепловое излучение с равномерным распределением стабилизированной температуры по площади генератора эталонного излучателя.

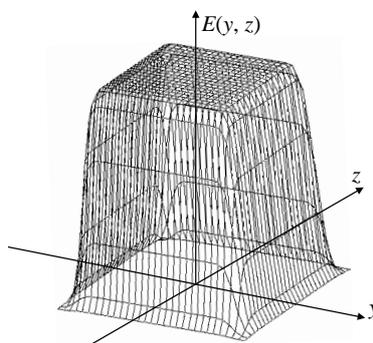


Рис. 6. Типовое распределение теплового излучения по площади эталонного излучателя

При осуществлении тестирования в статическом режиме набирается статистика преобразований различными ячейками преобразователя. Тестированию подлежат как зависимость выходного сигнала от степени нагрева, так и разброс этой зависимости относительно номинального значения, результатом которого является построение термограммы $D(T^\circ)$, где D – код, T° – температура. Оценка значений кода осуществляется за счет набора статистики по измерениям температуры пластины элементами термоэлектронного преобразователя, находящимися в прямоугольнике $j_{\min} \leq j \leq j_{\max}$, $k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$, где j_{\min} , j_{\max} , k_{\min} , k_{\max} – границы образа плоского площадного объекта, внутри которых не сказываются краевые эффекты, возникающие при разогреве/охлаждении пластины.

При линейной шкале измеряемых температур, температура T_m° эталонного излучателя должна устанавливаться от T_{\min}° до T_{\max}° с интервалом

$$\Delta T^\circ = \frac{T_{\max}^\circ - T_{\min}^\circ}{M},$$

где M – количество кодов, представляющих измеряемую

температуру; $T_{\min}^\circ \leq T^\circ \leq T_{\max}^\circ$ – диапазон измеряемых температур. Если тепловизионная система наблюдения работает в экспоненциальной шкале измеряемых температур (логарифмической шкале результатов измерения), m -е значение измеряемой температуры T_m° , которой должен соответствовать код

$$d_m \text{ должно определяться как } T_m^\circ = a^m T_{\min}^\circ, \text{ где } a = \sqrt[M]{T_{\max}^\circ / T_{\min}^\circ}.$$

Математическое ожидание $\tilde{D}(T_m^\circ)$ результатов измерения температуры T_m° определяется по зависимости

$$\tilde{D}(T_m^\circ) = [(j_{\max} - j_{\min} + 1)(k_{\max} - k_{\min} + 1)]^{-1} \sum_{j=j_{\min}}^{j=j_{\max}} \sum_{k=k_{\min}}^{k=k_{\max}} D(j, k, l).$$

В результате построения гистограммы распределения измеренных

тепловизионной системой значений $\hat{D}(j,k,l)$ интенсивностей теплового излучения относительно тестирующих прореженных значений D_m , приведенной на рис. 7, где ΔD_m - номинальная ширина разряда гистограммы; $\Delta \tilde{D}_m$ - реальная ширина области ненулевых значений распределения интенсивностей относительно заданного значения D_m ; \tilde{t}_{m-1}° , \tilde{t}_m° - области перекрытия ненулевых значений распределений интенсивностей сделан вывод, что основными причинами потерь информации, возникающих при тестировании тепловизионной системы наблюдения сигналом D_m , являются, во-первых, отклонение сглаженной ступенчатой линии, формируемой по математическим ожиданиям $\tilde{D}(T_m^\circ)$, от значений ступенчато-наклонной линии 1, $\tilde{D}(T_m^\circ) = D_m$, а во-вторых, перекрытие соседних разрядов гистограммы.

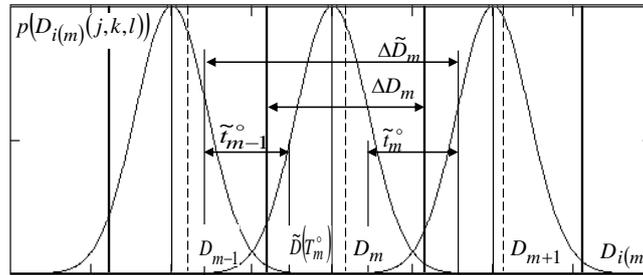


Рис. 7. Гистограмма распределения интенсивностей

Если одно и то же значение может быть отнесено $(m-1)$ -му разряду с вероятностью $P_{i(m-1)}$, и к m -му разряду с вероятностью $P_{i(m)}$, то с учетом ошибок классификации вероятность появления значения определяется как

$$\frac{P_{i(m-1)}^2}{P_{i(m-1)} + P_{i(m)}} + \frac{2P_{i(m-1)} \cdot P_{i(m)}}{P_{i(m-1)} + P_{i(m)}} + \frac{P_{i(m)}^2}{P_{i(m-1)} + P_{i(m)}} = P_{i(m-1)} + P_{i(m)}. \quad \text{С учетом этого}$$

факта информационные потери, возникающие вследствие перекрытия разрядов гистограммы, определяются как

$$\varepsilon_{T^\circ, 2} = - \sum_{m=1}^{\tilde{M}-1} \sum_{i(m) \in \tilde{t}_m} \left[P_{i(m-1)} \log \frac{P_{i(m-1)}}{P_{i(m-1)} + P_{i(m)}} + P_{i(m)} \log \frac{P_{i(m)}}{P_{i(m-1)} + P_{i(m)}} \right] \geq 0, \quad \text{что позволяет}$$

оценить потери информации.

В результате исследования потерь информации пары «объектив/термо-электронный преобразователь» (см. рис. 1) и оценки возникающей вследствие дисторсии предложено использовать генератор эталонных тестовых сигналов в виде матрицы $J \times K$ точечных источников теплового излучения, каждый из которых проецируется в свой термочувствительный элемент. Структура генератора представлена на рис. 8.

Величину дисторсии предложено определять путем оценки размеров диагоналей, проведенных из центра образа левого верхнего точечного источника (Y_1, Z_1) в центр правого нижнего источника (Y_5, Z_5) , $[(Y_1 - Y_5)^2 + (Z_1 - Z_5)^2]$, и из центра правого верхнего источника (Y_3, Z_3) в центр

левого нижнего (Y_7, Z_7) , $[(Y_2 - Y_7)^2 + (Z_2 - Z_7)^2]$ а также угла φ между этими диагоналями. Аберрации при «подушке»/»бочке» оцениваются как: $\Delta_1 = |0,5(Z_1 + Z_3) - Z_2|$; $\Delta_2 = |0,5(Y_3 + Y_5) - Y_4|$; $\Delta_3 = |0,5(Z_5 + Z_7) - Z_6|$; $\Delta_4 = |0,5(Y_7 + Y_1) - Y_8|$ (рис. 8).

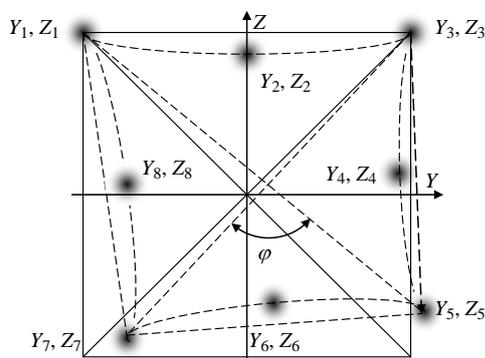


Рис. 8. Генерация эталонных сигналов для определения дисторсии
Сплошные линии - квадрат с диагоналями без дисторсий.

Пунктирные линии - аберрации типа «подушка».

Предложенный метод оценки дисторсии позволяет извлечь информацию о местоположении эталонных источников из общего теплового цифрового образа сцены на основании выполнения операций обработки полученных результатов: поиск кодов, которые могут относиться к образу эталонного излучателя в массиве данных на фоне кодов, которые могут относиться как к эталонному сигналу, так и к шуму; локализация области образа эталонного источника; расчет пространственного положения излучателя в системе координат, связанной с излучателем, по образу эталонного источника.

Для определения пространственно-динамических потерь информации, способных возникать на каждом этапе формирования теплового цифрового образа наблюдаемой сцены (см. рис. 1), предложено включать в генератор тестовых сигналов элемент с управляемой пространственно-частотной характеристикой. В качестве подобного элемента может служить пара пластин нагреваемых до заданной температуры T_t° с изменяемым зазором ζ между ними, размещенная над пластиной с температурой T_b° создающей разностно-температурный фон. Как выявлено во втором разделе данной диссертации (см. рис. 3), пространственная динамика инфракрасного детектора определяется пространственно-частотной характеристикой, что показано на рис. 9. Сигнал, формируемый тепловизионной системой наблюдения при поперечном зазоре сканирования подобной сцены, будет иметь вид (ξ - вспомогательный аргумент):

$$D(Y, Z) = \int_{-\infty}^{Y, Z} \frac{\kappa_d}{\sqrt{2\pi} b_{d, Y, Z}} \exp\left(-\frac{(\xi + \zeta)^2}{2(b_{d, Y, Z})^2}\right) d\xi + \int_{-\infty}^{Y, Z} \frac{\kappa_d}{\sqrt{2\pi} b_{d, Y, Z}} \exp\left(-\frac{(\xi - \zeta)^2}{2(b_{d, Y, Z})^2}\right) d\xi$$

Отношение ширины зазора ζ к параметру b , от которого зависит полоса пропускания тепловизионной системы, определяет глубину модуляции

выходного кода $a(\zeta/b) = D_{\max}(Y, Z)$. В свою очередь, уменьшение глубины модуляции приводит к потере информации, которая определяется зависимостью $\varepsilon_a = \sum_{m=a}^M -p_m \cdot \log p_m$.

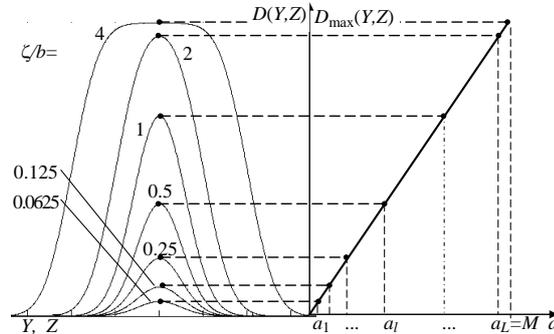


Рис. 9. Пространственно-частотная характеристика тепловизионной системы наблюдения.

Суммарная потеря информации на статических и пространственно-динамических передаточных характеристиках звеньев определяется как $\varepsilon = \varepsilon_{T^{\circ},1} + \varepsilon_{T^{\circ},2} + \varepsilon_{dis} + \varepsilon_{af_ab} + \varepsilon_a$, где $\varepsilon_{T^{\circ},1} + \varepsilon_{T^{\circ},2}$ - потери на тепло-сигнальной характеристике; $\varepsilon_{dis} + \varepsilon_{af_ab}$ - потери на дисторсии и аффинных aberrациях; ε_a - потери на сокращении динамического диапазона.

В результате оценки тепло-сигнальной характеристики, дисторсии, разрешающей способности тепловизионной системы наблюдения и определения требований к эталонным сценам, формируемым генератором эталонных сигналов, определена задача разработки эталонного генератора тестирующих сигналов, используемого для комплексной оценки параметров системы наблюдения и её классификации по принципу «годен/негоден».

В четвертом разделе представлен программно-аппаратный комплекс для генерации тестовых сигналов и контроля параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден».

Для оценки тепло-сигнальной характеристики разработан генератор эталонных тепловых сигналов (ГЭТС), излучатели которого представлены в виде двух площадных элементов Пельтье, расположенных параллельно с контролируемым зазором по границе между ними.

Структурная схема, представленная на рис. 10, демонстрирует способ работы генератора эталонных тепловых сигналов таким образом: от источника питания 1 к блоку управления 2 подается питание. Блок управления 2 через усилители мощности 3 и 4 подает команду нагрева или охлаждения параллельно расположенным элементам Пельтье 5 и 6. Цифровые датчики температуры 8 и 9, имеющие тепловой контакт с элементами Пельтье 5 и 6, отслеживают значения температур каждого из элементов Пельтье 5 и 6. Значения температур подают на вход блока управления 2, где сравнивают с заранее заданными значениями. При помощи связи блока управления 2 с элементами Пельтье 5 и 6 через цифровые датчики температуры 8 и 9 создают необходимый нагрев и охлаждение элементов Пельтье 5 и 6. Температуру

каждого из элементов Пельтье 5 и 6 поддерживают в соответствии со значениями, установленными блоком управления 2. Теплоизоляцию элементов Пельтье 5 и 6 осуществляют за счет расположения между элементами Пельтье 5 и 6 термоизолятора 7.

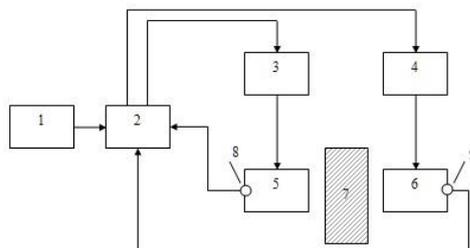


Рис. 10. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки тепло-сигнальной характеристики

Управление температурой элемента Пельтье от цифрового контроллера позволяет повысить точность установки температуры эталонной сцены для каждого отсчета тепло-сигнальной характеристики и сократить время на набор статистики по всей характеристике в целом.

В качестве источника эталонного образа для оценки дисторсии разработан генератор эталонных тепловых тестовых сигналов, выполненный в виде матрицы излучающих элементов, каждый из которых проецируется в свой термочувствительный элемент тепловизионной системы (рис. 11). Расчет интенсивности излучения, необходимой для проведения экспериментов по тестированию тепловизионной системы, проводился по модели, разработанной в разделе 2 диссертации. На принципиальной схеме, показанной на рис. 11а, изображена матрица SMD (Surface Mount Device) резисторов.

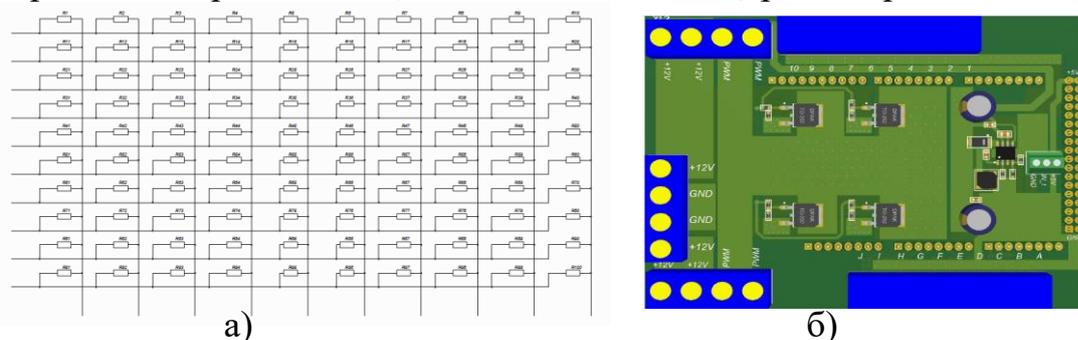


Рис. 11. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки дисторсии

Для сокращения времени контроля источник эталонного образа располагается по краям наблюдаемой сцены в точках, определенных рис. 8, при этом включается один из резисторов (в правом (левом) верхнем (нижнем) углу – правый (левый) верхний (нижний), в середине правого (левого) столбца – правый (левый), а в середине правой (левой) строки – правый (левый)). Включение и выключение излучающих элементов в нужных координатах осуществляется благодаря блоку управления, модель которого представлена на рис. 11б.

Раздельное включение излучающих тепло резисторов позволяет сократить время на проведение тестирования и последующую обработку цифрового образа сцены, с учетом потерь времени на физическое перемещение эталонного генератора в требуемую точку наблюдаемой сцены.

В качестве источника эталонного тестового сигнала для оценки динамических потерь и разрешающей способности тепловизионной системы наблюдения разработан генератор эталонного тестового сигнала, выполненный в виде тепловыделяющих элементов – пластин, расположенных под углом друг к другу, структурная схема которого представлена на рис. 12.

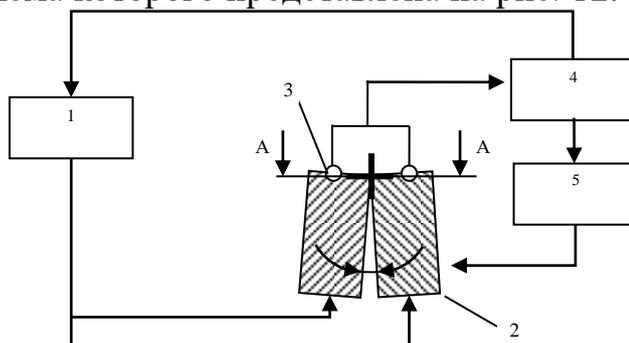


Рис. 12. Генератор тестовых сигналов для оценки разрешения

Принцип работы такого генератора заключается в возможности при помощи микрометрического винта производить корректировку угла расположения излучающих эталонный сигнал пластин относительно друг друга. Цифровые датчики температуры (3), установленные на пластинах теплового излучателя, подают значения температур пластин на вход устройства управления (4) на базе микропроцессора, обратная связь которого с источником питания (1) осуществляется с помощью сигналов от цифровых датчиков температуры. Блок охлаждения (5), вход которого соединен с устройством управления, позволяет поддерживать и корректировать значения тестовых сигналов.

За счет управляемой установки угла расположения пластин достигается экономия времени на тестирование разрешения.

Программный комплекс обработки полученной информации производит сравнение образов сцен, формируемых на выходе тепловизионной системы с эталонными образами, полученными в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, с реальными образами, формируемыми тестируемой тепловизионной системой на основании методов обработки информации, предложенных в третьей главе данной диссертации. Если не выполняется хотя бы одно условие, то требуется настройка тепловизионной системы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации решена научно-техническая задача, имеющая важное народно-хозяйственное значение, и заключающаяся в разработке аппаратно-программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой для повышения эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения. В целом по

работе можно сделать следующие **выводы**.

1. На основании системного анализа проблемы тестирования тепловизионных систем наблюдения сделан вывод о том, что их классификация по принципу «годен/не годен» может быть проведена с помощью аппаратно-программного комплекса генерации эталонных тестовых сигналов и обработки цифровых образов эталонных сцен, формируемых генератором и наблюдаемых тепловизионной системой наблюдения.

2. Сформулирована концепция физического моделирования генератора эталонных образов сцен, заключающаяся в том, что генерируемые тепловые образы должны быть ориентированы на тестирование отдельных протекающих в системе физических процессов, а их реализация должна быть достаточно простой.

3. На основании сформулированной концепции произведена постановка цели диссертации – повышение эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения за счет создания управляемого аппаратно-программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой.

4. Разработана модель генерации теплового излучения, положенная в основу формирования структур эталонных генераторов тепловых сцен и исследовано взаимодействие теплового излучения со средой.

5. Разработана модель формирования теплового образа наблюдаемой точки в плоскости расположения фоточувствительных элементов термоэлектронного преобразователя тепловизионной системы наблюдения.

6. Определены закономерности образования искажений, вносимых элементами тестируемой системы на каждом этапе формирования теплового образа сцены, такие как виньетирование (неравномерность тепло-сигнальной характеристики), дисторсия, контраст (разрешающая способность).

7. Разработана модель распространения теплового излучения от объектов наблюдаемой сцены; произведено моделирование процесса формирования теплового образа наблюдаемой сцены системой от генерации до получения цифровой модели, моделирование потерь при формировании теплового образа наблюдаемой сцены тепловизионной системой наблюдения.

8. Разработаны модели оценки таких характеристик теплового цифрового образа сцены, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика) при рассмотрении доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала.

9. Определен модулирующий фактор для тепло-сигнальной характеристики и сформулированы понятия средней статической чувствительности и статической чувствительности этого фактора.

10. Показана связь потерь информации в канале измерения пространственных координат с абберациями, вносимыми парой объектив/термоэлектронный преобразователь.

11. В результате исследования принципов оценки тепловизионной системы наблюдения определены основные объекты эталонной сцены и сформированы проблемно ориентированные модели излучения тепловых сигналов, каждый из которых предназначен для контроля заданного параметра тепловизионной системы наблюдения, предложена структура устройства тестирования тепловизионных систем наблюдения, которая позволяет повысить качество тестирования при одновременном сокращении времени обработки тепловых образов сцен.

12. Предложен вариант реализации аппаратно-программного комплекса для генерации эталонных тепловых образов и контроля параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден».

13. Разработано программное обеспечение по управлению процессом тестирования и обработке тепловых образов эталонных сцен, позволяющее решать задачи оценки потерь информации в тепловизионных системах наблюдения.

14. Методы, научные и технические решения, полученные в диссертации, были использованы при разработке прототипа тестирующей системы тепловизионных средств наблюдения различного назначения.

15. Теоретические результаты диссертации внедрены в учебный процесс, а практические (устройство генерации эталонных тепловых образов и программное обеспечение управления тестированием) в промышленность с техническим эффектом – сокращение времени тестирования при одновременном повышении его качества.

16. Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в создании эталонного генератора и метода обработки цифровых моделей сцен для идентификации информационных потерь, возникающих при наблюдении динамически перемещающихся в пространстве тепловых объектов.

По теме диссертации опубликовано 32 печатных работы, основными из которых являются:

Публикации в журналах из списка ВАК.

1. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Настройка ПИД-регулятора в системе управления устройством тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 218-222.

2. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Кобышева Е. А. Особенности реализации стендов контроля фотоприемников инфракрасного спектра. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 77-79.

3. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Особенности реализации излучающего устройства тестирования тепловизионных систем при взаимодействии с внешней средой. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 245-250.

4. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Построение статических передаточных характеристик по элементам тест-объекта для канала измерения пространственных координат. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 62-66.
5. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Тест-объект для контроля параметров тепловизоров. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 12.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 308-311.
Публикации в журналах из списка Scopus.
6. Filippova E., Akimenko T. Computer modeling of control the thermal imaging system surveillance. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Т. 11386 LNCS. С. 129-136.
Объекты интеллектуальной собственности.
7. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Ларкин Е. В., Лучанский О. А. Устройство тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Патент на полезную модель RU 191285 U1, 01.08.2019. Заявка № 2019117661 от 06.06.2019.
8. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Филиппов А. Е. Программный модель управления устройством тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019661213, 22.08.2019. Заявка № 2019619993 от 12.08.2019.
9. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Ларкин Е. В. Тест-объект для измерения разрешения тепловизоров. Патент на полезную модель RU 176316 U1, 16.01.2018. Заявка № 2017126695 от 25.07.2017.

Авторское редактирование

Подписано в печать 28.03.2024

Формат бумаги 70x100^{1/16}. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 003а
Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95