

# Исследование влияния светотехнической схемы оптических министиков на их характеристики

С.А. ГОЛУБИН<sup>1</sup>, В.М. КОМАРОВ<sup>2</sup>, А.Н. ЛОМАНОВ<sup>2</sup>, В.С. НИКИТИН<sup>3</sup>,  
Э.И. СЕМЁНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПП «Тензосенсор», <sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва»,

<sup>3</sup> ООО «НТЦ «Интрофизика», Ярославская обл., г. Рыбинск

E-mail: 707gsa@mail.ru

## Аннотация

Описаны устройство и принцип действия оптического министика и варианты светотехнической схемы министиков. Исследованы характеристики экспериментальных образцов министиков различных схем. Проанализированы результаты исследования и сравнены преимущества и недостатки различных светотехнических схем.

**Ключевые слова:** оптический министик, управление робототехникой, коммутационное устройство, упругодеформируемый полимерный элемент, экспериментальное исследование.

Усложнение современной робототехники и повышение её функциональности за счёт оснащения сложными манипуляторами требует применения компактных и многофункциональных устройств ввода. Одним из видов таких устройств являются министики – двукоординатные миниджойстики, управляемые пальцем руки, в отличие от обычных джойстиков, управляемых всей кистью руки. Движение пальцев в 5–7 раз быстрее движения кисти руки, что позволяет намного быстрее и точнее формировать управляющие воздействия. А малые размеры мини-

стиком позволяют размещать их по несколько штук на панели или ручке управления.

Традиционные министики, построенные на резистивном принципе, имеют ряд недостатков: сложность в производстве, низкий ресурс, постепенное изменение характеристик в процессе эксплуатации.

ООО «НПП «Тензосенсор» с участием специалистов ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва» разработан оптический министик [1, 2]. Он отличается простотой, технологичностью в массовом производстве, высокой надёжностью (вследствие отсутствия механически контактирующих и деформируемых резистивных элементов), бесшумностью, пожаро- и взрывобезопасностью, травмобезопасностью, лёгкостью и многофункциональностью (возможностью перепрограммирования выполняемых функций [3]).

Внешний вид и устройство варианта оптического министика представлены на рис. 1 и 2. Министик состоит из печатной платы 1 и выполненного за одно целое корпуса 2, упругодеформируемого полимерного элемента 3, расположенного под приёмником излучения (ПИ) (фотодиод, фоторезистор) 7, и не менее одного источника

света (ИС) (светодиода, лазера) 6, которые соединены с микропроцессором (на рисунке не показан). Упругодеформируемый элемент 3 выполнен из эластичного полимерного материала и содержит светоотражающую или светопоглощающую поверхность 5, расположенную над ИС 6 и ПИ 7.

Принцип работы оптического министика заключается в эффекте отражения света от светоотражающей поверхности полимерного упругодеформируемого элемента. При нажатии оператором на управляющую рукоятку светоотражающая поверхность деформируется в зависимости от направления и величины нажатия. Деформация светоотражающей поверхности меняет распределение отражённого света, которое фиксируется ПИ. На основании реакции ПИ микропроцессор министика производит вычисление текущего положения управляющей рукоятки.

Разработаны четыре сравниваемые ниже светотехнические схемы министика с общим ПИ и: тремя ИС (1); четырьмя ИС, расположенными по-



Рис. 1. Внешний вид оптического министика

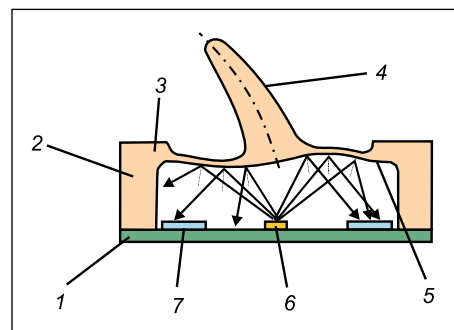
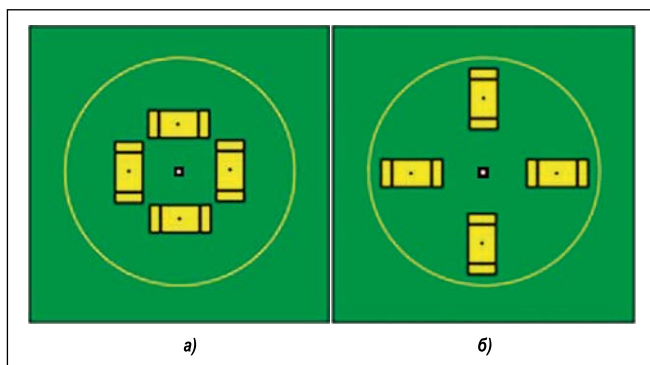


Рис. 2. Оптический министик: 1 – печатная плата, 2 – корпус, 3 – упругодеформируемый элемент, 4 – управляющая рукоятка, 5 – светоотражающая поверхность, 6 – источник света (светодиод, лазер), 7 – приёмник излучения (фотодиод, фоторезистор)

Рис. 3. Схемы министиков с поперечным (а) и радиальным (б) расположением четырёх источников света



перечно направлению отклонения рукоятки (2); четырьмя ИС, расположенными радиально, (3); шестью ИС (4).

Различие министиков с четырьмя радиально и с четырьмя поперечно расположенными ИС показано на рис. 3.

Целью данного экспериментального исследования являлось определение влияния светотехнической (оптической) схемы министика на его передаточную функцию – зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения его управляющей рукоятки.

Полезный сигнал министика представляет собой два числовых значения, которые соответствуют величинам отклонения рукоятки министика по координатам  $X$  и  $Y$ . Единицей измерения выходного сигнала являются отсчёты АЦП микроконтроллера министика, которые соответствуют отношению напряжений на ПИ министика к опорному напряжению АЦП. Напряжение на ПИ определяется интенсивностью падающего на него отражённого света, которая зависит от величины отклонения управляющей рукоятки министика.

Эксперимент состоял в регистрации показаний министика по осям  $X$  и  $Y$  в точках с заданными величиной отклонения рукоятки министика от центрального положения и направлением отклонения, которое задавалось углом поворота корпуса министика.

Для исследования зависимости сигналов министика от величины линейного отклонения рукоятки и угла поворота министика (передаточной функции) был разработан универсальный испытательный стенд для автоматизированного исследования характеристик министиков. Стенд (рис. 4) содержит поворотное основание 4, на котором закреплён министик 3, и элемент 2, который отклоняет рукоятку министика от центрального положения строго влево или вправо. Поворот основания и отклонение рукоятки производятся шаговыми двигателями. Для обеспечения точности позиционирования и выставления начальной позиции на валах двигателей установлены абсолютные цифровые энкодеры (датчики угла поворота), обеспечивающие погрешность установки угла поворота не более  $0,35^\circ$ .

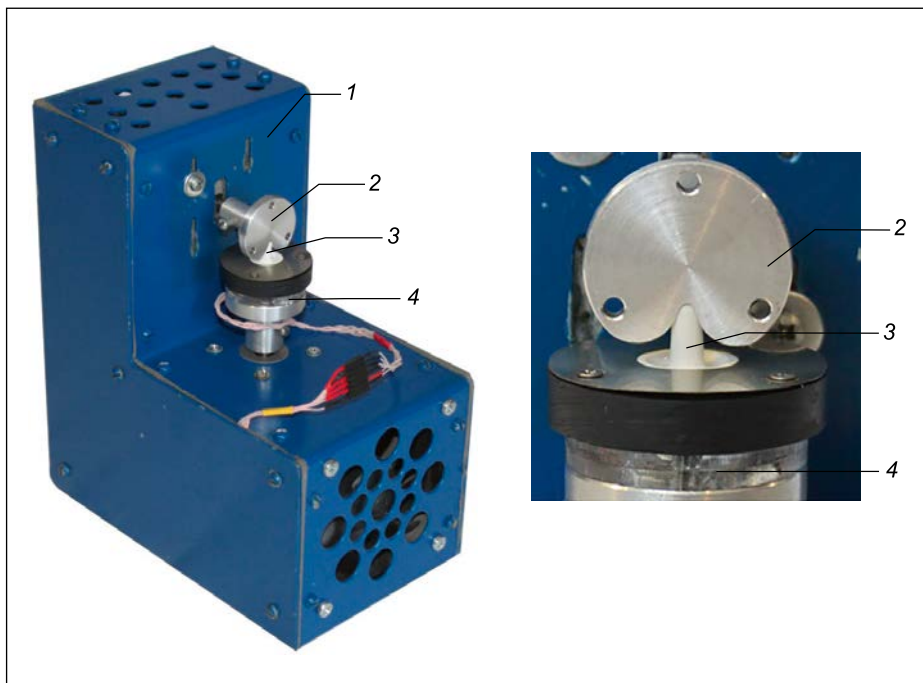


Рис. 4. Универсальный испытательный стенд: 1 – корпус стенда, 2 – отклоняющий элемент, 3 – министик, 4 – поворотное основание

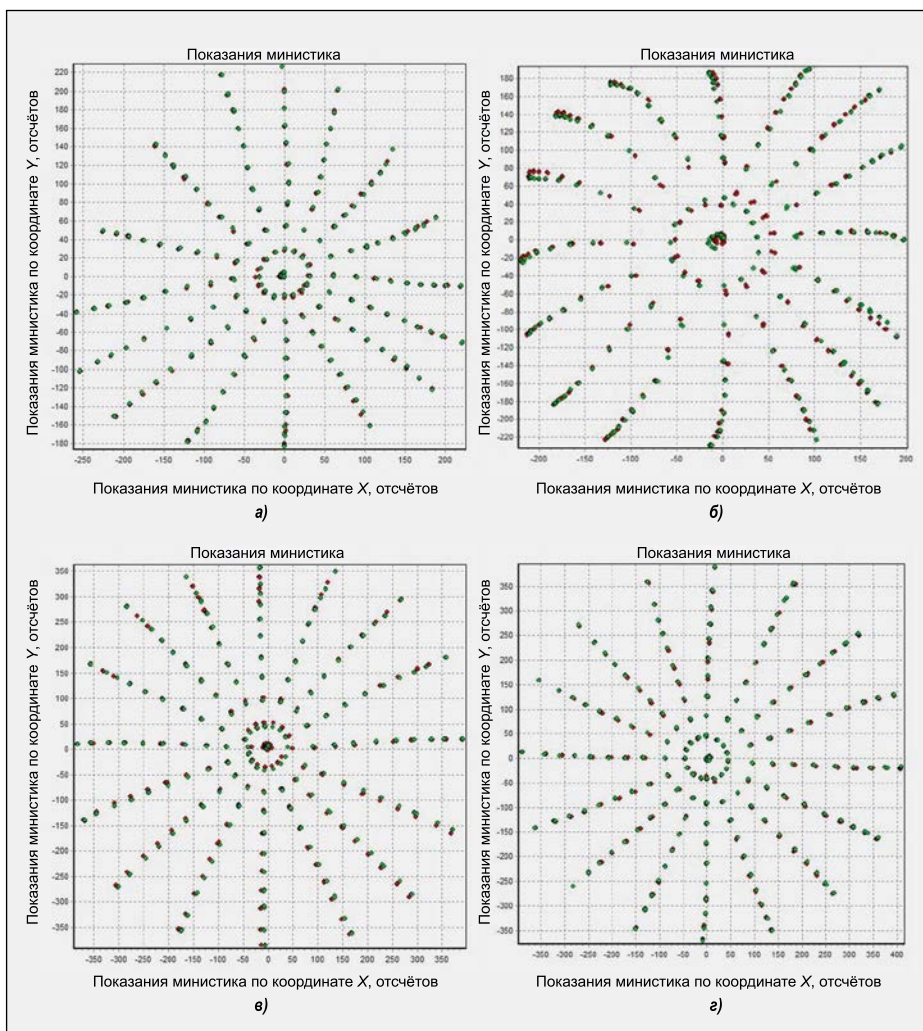


Рис. 5. Лучевые диаграммы показаний министиков с тремя (а), четырьмя поперечно (б) и радиально (в) расположенными, а также с шестью (г) источниками света

Параметры качества сигнала исследуемых оптических министиков

Тип светотехнической схемы министика	с 3-мя ИС	с 4-мя поперечно расположенными ИС	с 4-мя радиально расположенными ИС	с 6-ю ИС
Диапазон значений (амплитуда) по оси X	476	414	775	798
Диапазон значений (амплитуда) по оси Y	408	414	742	758
Макс. разброс значений, %	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Макс. нелинейность по оси X, %	5,83	13,25	2,40	2,45
Макс. нелинейность по оси Y, %	5,91	14,27	4,75	3,23
Макс. гистерезис по оси X, %	0,84	4,35	1,16	0,75
Макс. гистерезис по оси Y, %	0,99	2,42	1,75	1,06

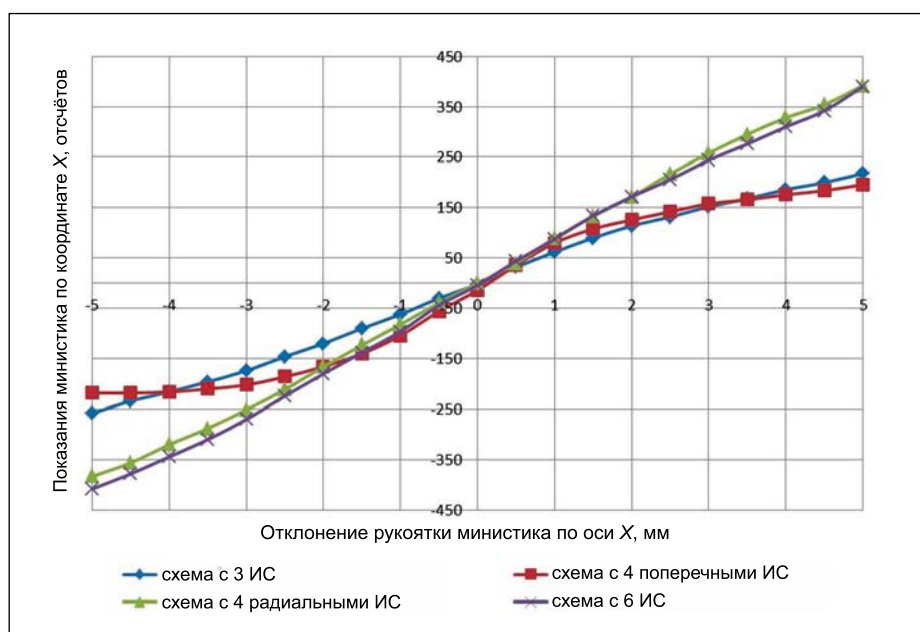


Рис. 6. Передаточная функция министиков различных схем по координате X (при угле поворота министика 0°)

Для обеспечения адекватности эксперимента по сравнению светотехнических схем образцы министиков были изготовлены со следующими одинаковыми компонентами: упругодеформируемый элемент одинаковых размеров и формы; ИС — светодиоды *KP-3216F3C* производства *Kingbright*; ПИ — *PIN*-фотодиод *PD15-21B/TR8* производства *Everlight*; тип измерителя — 12-разрядный АЦП, интегрированный в микроконтроллер *HT46R02B* производства *Holtek*.

Снятие показаний министиков проводилось при следующих условиях: пределы отклонения рукоятки министика от центра: от  $-5$  до  $+5$  мм, с шагом  $0,5$  мм; направления отклонения: влево — от  $+5$  до  $-5$  мм, впра-

во — от  $-5$  мм до  $+5$  мм; угол поворота министика: от  $0$  до  $157,5^\circ$ , с шагом  $22,5^\circ$ ; число замеров показаний: 5, с последующим усреднением полученных значений.

По результатам тестирования программа стенда автоматически строит лучевую диаграмму<sup>1</sup>. На ней результаты измерений полезного сигнала

<sup>1</sup> Лучевая диаграмма позволяет визуально оценивать качество выходного сигнала министика: амплитуду сигнала, точность, линейность, гистерезис.

<sup>2</sup> Точность — параметр характеризующий разброс значений полезного сигнала при определённом отклонении рукоятки.

Нелинейность — параметр, характеризующий отклонение кривой передаточной функции исследуемого министика от прямой линии.

Гистерезис — параметр, характеризующий различие значений выходного сигнала при одинаковой величине отклонения рукоятки, но разных (противоположных) направлениях его изменения.

министика представлены в виде точек с координатами X и Y, соответствующими числовым значениям выходного сигнала министика. Результаты измерений, полученные при отклонении рукоятки вправо, представлены точками красного цвета, а влево — зелёного. Лучевые диаграммы исследованных министиков приведены на рис. 5.

Графики передаточной функции министиков указанных выше светотехнических схем по оси X (угол поворота  $0^\circ$ ) представлены на рис. 6, а по оси Y (угол поворота  $90^\circ$ ) — на рис. 7.

Для возможности сравнения графики функций различных министиков наложены друг на друга.

Качество полезного сигнала реального министика оценивается по трём показателям: точность, нелинейность и гистерезис<sup>2</sup>.

Для оценки точности показаний использовалось выражение

$$\delta = |\text{СКО} / \Delta X|,$$

где  $\delta$  — относительное отклонение показаний министика по данной координате, СКО — среднее квадратическое отклонение показаний министика по данной координате,  $\Delta X$  — диапазон значений (амплитуда) передаточной функции по данной координате.



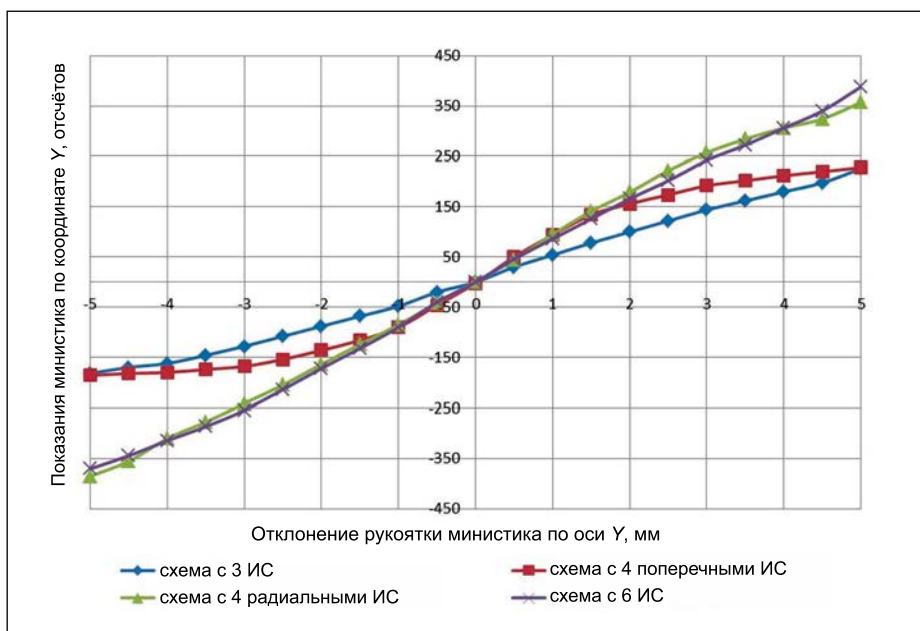


Рис. 7. Передаточная функция министиков различных схем по координате Y (при угле поворота министика 90°)

Для оценки нелинейности при помощи метода наименьших квадратов строилась аппроксимирующая функция прямой линии вида  $X = k \cdot x + b$ , и нелинейность  $N_L$  оценивалась как

$$N_L = |X - X_{\text{РАСЧ}}| / \Delta X,$$

где  $X$  и  $X_{\text{РАСЧ}}$  — фактическое и рассчитанное (с помощью аппроксимирующей функции) значение показаний министика по данной координате в данной точке;  $\Delta X$  — диапазон значений (амплитуда) передаточной функции по данной координате.

Гистерезис показаний  $G$  оценивался по выражению

$$G = |X_{\text{ПР}} - X_{\text{Л}}| / \Delta X,$$

где  $X_{\text{ПР}}$  — значение показаний министика по данной координате в данной точке при перемещении рукоятки вправо;  $X_{\text{Л}}$  — при перемещении влево;  $\Delta X$  — диапазон значений (амплитуда) передаточной функции по данной координате.

Результаты расчётов представлены в таблице.

## Выводы

- Выбранные оптические схемы министиков на основе упругодеформируемого элемента позволяют создавать работоспособные и высокоэффективные устройства.

- Максимальный диапазон отклонения рукоятки министика составляет  $\pm 5,0$  мм, что укладывается в оптимальный диапазон амплитуд отклонения пальцев руки порядка 12–20 мм.

- Мёртвая зона министика не превышает 0,5 мм по всем координатам.

- Министик по схеме с общим ПИ и шестью ИС обладает наилучшими характеристиками полезного сигнала: высокой амплитудой, симметричностью передаточной функции, низкой нелинейностью (не более 3,3 %) и малым гистерезисом (не более 1,1 %).

- Министик по схеме с общим ПИ и четырьмя ИС, расположенными радиально, по характеристикам полезного сигнала незначительно уступает министик с шестью излучателями. Он обладает высокой амплитудой сигнала, симметричностью передаточной функции, низкой нелинейностью (менее 5 %) и низким гистерезисом (менее 2 %).

- Министик по схеме с общим ПИ и тремя ИС обладает низким гистерезисом выходного сигнала, но его передаточная функция несимметрична и нелинейна, а амплитуда сигнала в 1,7 раз ниже, чем у министика с шестью ИС.

- Министик по схеме с общим ПИ и четырьмя ИС, расположенными поперечно, обладает наихудшими характеристиками: высокой нелинейностью, низкой амплитудой и высоким гистерезисом.

Таким образом, наилучшими с точки зрения качества сигнала могут быть признаны светотехнические схемы министика с шестью ИС и с четырьмя радиально расположенными ИС.

Передаточная функция оптических министиков с этими светотехническими схемами соответствует основным требованиям, предъявляемым к средствам управления сложной робототехникой, манипуляторами и летательными аппаратами.

Светотехническая схема министика с тремя ИС позволяет создавать самые дешёвые приборы. Она годится для применений, не предъявляющих высоких требований к сигналу по точности и линейности, и рекомендуется для производства полиморфных переключателей разных типов [6].

Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки в данном направлении проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок — *RFMEFI57914X0087*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубин С.А., Комаров В.М., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Семёнов Э.И. Исследование характеристик оптических министиков // Светотехника. — 2015. — № 6. — С. 17–20.
2. Голубин С.А., Комаров В.М., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Семёнов Э.И. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков с общим излучателем // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва. — 2015. — № 1.
3. Никитин В.С., Белов Р.Б., Голубин С.А. Цифровые оптические министики для управления робототехническими комплексами // Электросвязь. — 2015. — № 11. — С. 68–69.
4. Никитин В.С., Белов Р.Б. Управлять без рычагов // Наука и жизнь. — 2012. — № 12.
5. Никитин В.С., Морозов П.П. Оптический джойстик / Заявка на изобретение № 2013112435 РФ, 2014. Бюл. № 27.
6. Никитин В.С. Способ коммутации электрических цепей и многофункциональный переключатель для его осуществления / Патент РФ № 2455678, 2012. Бюл. № 19.

## Защита диссертации аспирантами кафедры светотехники НИУ «МЭИ»



**Голубин Сергей Александрович**, инженер. Окончил в 2013 г. РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Инженер-системотехник ООО «НПП «Тензосенсор». Аспирант ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



**Комаров Валерий Михайлович**, кандидат техн. наук, профессор. Окончил в 1972 г. РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Зав. кафедрой «Вычислительные системы» ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



**Ломанов Алексей Николаевич**, кандидат техн. наук. Окончил в 2003 г. РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Декан факультета радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



**Никитин Владимир Степанович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1976 г. Тбилиское Высшее артиллерийское командное училище. Директор ООО «НТЦ «Интрофизика»



**Семёнов Эрнст Иванович**, доктор техн. наук. Окончил в 1965 г. РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Профессор ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва». Область научных интересов: контроль над

процессами получения тонких плёнок, автоматика, радиоэлектроника, микроэлектроника, вычислительная техника

На кафедре светотехники НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой Георгий Валентинович Боос, 23 июня 2016 года успешно прошла защита кандидатской диссертации аспиранта кафедры Шагалова Олега Владимировича на тему «Быстрые и точные алгоритмы расчёта сигналов оптико-электронной системы дистанционного зондирования атмосферы из космоса», руководитель д.т.н., проф. В.П. Будак. Диссертация посвящена вопросам исследования земной поверхности и атмосферы с помощью оптического излучения с орбиты – оптическому дистанционному зондированию. Среди задач, стоящих перед всем человечеством есть ряд таких, решать которые, не прибегая к методам дистанционного зондирования, принципиально невозможно. Важнейшей из них представляется мониторинг малых газовых компонентов атмосферы, вносящих вклад в парниковый эффект. Такие исследования возможны только при очень высокой точности измерений. За последние годы измерительная аппаратура сделал большой шаг вперёд, и эти измерения стали возможны. Поскольку такие задачи являются косвенными, боль-

шим этапом их решения является построение прямых моделей переноса излучения в атмосфере, точность которых диктуется возможностями измерительных систем. При этом спутниковые измерения подразумевают огромное количество информации, которая должна обрабатываться практически в реальном времени, что требует от математических моделей высокой скорости вычислений, помимо высокой точности. В традиционных методах эти параметры обратно пропорциональны друг другу, в виду чего ни один алгоритм не отвечает этим требованиям одновременно. В диссертации Шагалова О.В. предложены новые алгоритмы на основе метода синтетических итераций, разрабатываемом в ядерной физике. Использование данного метода позволяет обойти проблему баланса скорости и точности, присущую алгоритмам на основе традиционных методов. В диссертации разработаны два новых метода для решения задачи переноса излучения в однородной атмосфере, а также намечен путь к решению задач переноса в среде с произвольной геометрией.



Председатель Специализированного совета д.т.н., проф. А.А. Григорьев поздравляет О.В. Шагалова с успешной защитой. Конференц-зал кафедры светотехники НИУ «МЭИ»