

# Методы и средства повышения достоверности электронно-оптического диагностирования изоляции контактной сети

Ю. И. ПЛОТНИКОВ, докт. техн. наук, профессор,

Д. А. СКОРОХОДОВ, докт. техн. наук, профессор,

А. Л. СТАРИЧЕНКОВ, канд. техн. наук, доцент, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко, Санкт-Петербург



**Надежность контактной сети электрифицированных железных дорог в значительной степени зависит от выбора и реализации стратегии технического обслуживания и ремонта.**

**Существенную роль в оценке состояния контактной сети играют мобильные системы технического диагностирования изоляции по ультрафиолетовому (УФ) излучению. Метрологическая эффективность данных систем может быть повышена.**

Использование систем УФ-диагностики на базе двухспектральных камер типа DayCorII позволяет уменьшить число перекрытий изоляции в несколько раз [2, с. 54–62]. При этом существенно сокращаются трудовые, временные и финансовые ресурсы, необходимые для обслуживания и ремонта изоляции электрифицированных линий.

Но, как показывает опыт эксплуатации мобильных УФ-систем диагностики на базе вагонно-лабораторий для испытаний контактной сети (ВИКС), основной показатель их эффективности — достоверность оценки технического состояния изоляции — недостаточно высок. Это связано с целым рядом причин методического, аппаратного и организационно-технического характера.

## Достоверность и чувствительность метода УФ-диагностики

Под достоверностью принято понимать вероятность соответствия результатов диагностики истинному (фактическому) техническому состоянию объекта [3, с. 38–46]. При оценке достоверности возможны две ошибки. Ошибка первого рода —  $\alpha$ , когда исправный изолятор принимается за неисправный (ложный дефект), и второго рода —  $\beta$ , когда неисправный изолятор принимается за исправный (пропуск

дефекта). С точки зрения надежности контактной сети (КС) наиболее опасен второй вариант, который в самом крайнем случае может привести к перекрытию изоляции со всеми вытекающими тяжелыми последствиями. Но даже менее существенный дефект, сопровождающийся поверхностными частичными разрядами (ПЧР) или короной, приводит к электрохимической коррозии и постепенному разрушению элементов изоляции в результате контакта с азотной кислотой, выделяющейся при реакции воды с выделяющимся из воздуха

азотом. Кроме того, наличие разрядов и короны приводит к потерям энергии, радиопомехам и ухудшению качества радиосвязи. В практике эксплуатации изоляции КС принято считать, что отсутствие ПЧР или короны является одним из признаков нормального состояния изоляции, а их наличие, напротив, говорит об имеющихся дефектах или загрязнении изоляции.

Недостатки существующих мобильных УФ-систем на базе камер DayCorII и ВИКС, связанные с ошибками  $\beta$  (пропусками дефектной изоляции), иллюстрирует график (рис. 1). По данным Горьковской железной дороги, в 2007 г. с ВИКС обнаружено лишь 12 из 227 дефектов (или всего 5,3%), а в 2008 г. — 41 из 170 (или 24,1% соответственно). Остальные дефектные изоляторы были обнаружены путем пеших обходов КС и использованием УФ-камер в автономном варианте.

Невысокая эффективность мобильных УФ-систем имеет причины объек-

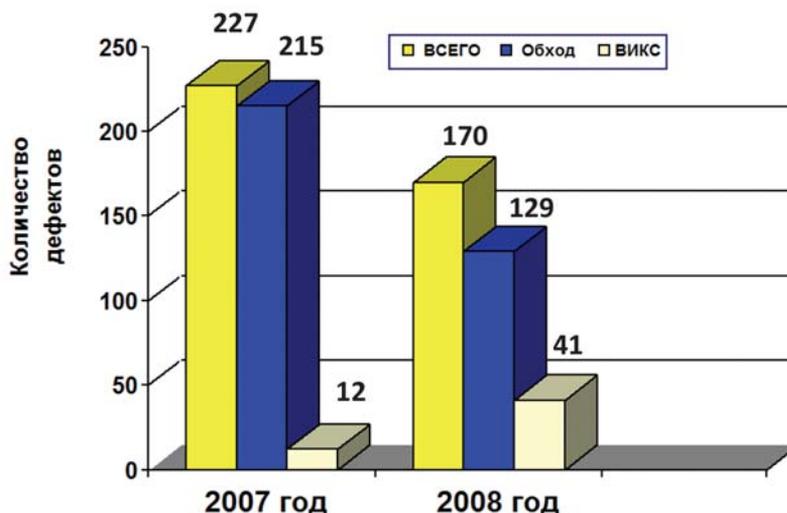


Рис. 1. Соотношение количества дефектов, выявленных разными способами в 2007 и 2008 гг.

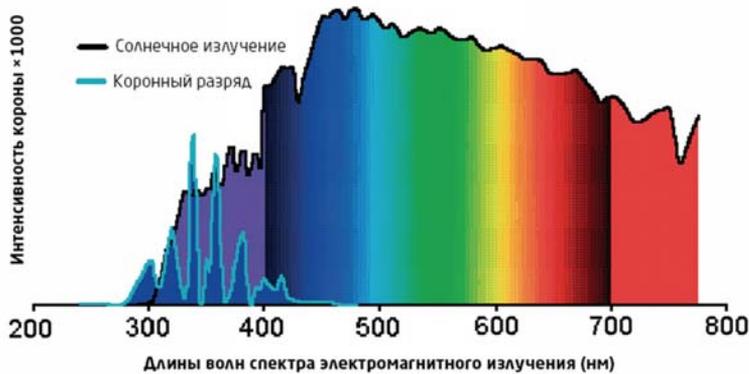


Рис. 2. Спектр излучения короны на фоне спектрограммы солнечного излучения

тивного и субъективного характера. К первой группе можно отнести следующие:

- наблюдение изоляции с ВИКС производится только в одном ракурсе («тыльная» сторона изоляторов не наблюдается);
- так как ВИКС движется со скоростью 60–80 км/ч и более, отсутствует возможность использовать режим накопления и усиления сигнала (камера работает с пониженной частотой: 050; 1,0; 5/4 с).

К субъективным факторам, снижающим достоверность УФ-диагностики изоляции с ВИКС, относятся:

- недостаточная чувствительность камеры DayCorII;
- малые углы поля зрения, не позволяющие одновременно наблюдать как подвесную, так и консольную, фиксаторную изоляцию и линии ДПР;
- отсутствие возможности оперативной и адаптивной подстройки камеры в зависимости от внешних условий наблюдения;
- отсутствие непосредственного цифрового интерфейса и использование устаревшего программного обеспечения.

Проведенные в 2006 г. натурные испытания УФ-системы показали [2], что из 53 дефектов изоляции КС, выявленных УФ-системой на базе DayCorII, контактными способами измерения подтвердились 52 дефекта, или 98% от общего числа. Однако на практике это означает лишь экспериментальную оценку ошибки первого рода  $\alpha$  — вероятности ложного отказа; она составила около 2%. Для выявления ошибки второго рода  $\beta$  — пропуска отказов — на практике потребовалось бы проверить контактными способами более 1000 изоляторов, попавших в поле зрения УФ-системы диагностики на многокилометровом обследуемом участке КС. Это испытание в связи с его боль-

шой трудоемкостью и высокими временными и финансовыми затратами проведено не было.

Важнейшей характеристикой, определяющей величину интервала ( $E_{cp} - E_{min}$ ) а, следовательно, и достоверность УФ-диагностики (Д), является чувствительность детектора камеры  $E_{min}$ . Рассмотрим эту характеристику более подробно. УФ-диапазон спектра электромагнитного излучения лежит левее видимого диапазона и составляет примерно от 400 до 200 нм. На рис. 2 представлены фрагмент спектрограммы солнечного излучения и спектр излучения короны [4]. Последний показан с увеличением масштаба в 1000 раз и выделен синим цветом. Спектр излучения короны соответствует электромагнитному излучению атмосферного азота при его ионизации. Механизм данного процесса описан в [2] и, в частности, может возникать вследствие наличия дефекта или загрязнения изоляции. На рисунке видно, что спектр короны имеет два ярко выраженных максимума, приходящихся на 340 и 360 нм. Мощность излучения солнца в этих диапазонах также велика.

Чтобы иметь возможность диагностировать изолятор при дневном свете, в современных УФ электронно-оптических дефектоскопах используется диапазон 240–280 нм, соответствующий так называемому диапазону UVc. В этом диапазоне солнечная радиация практически полностью поглощается молекулами атмосферного озона, и наблюдение изоляции возможно практически без помех. Для выделения указанного спектрального диапазона на практике в УФ-канал камеры перед детектором устанавливается специальный оптический фильтр.

УФ-детектор рассчитывается и изготавливается таким образом, чтобы обеспечить наибольшую спектральную чувствительность именно в диапазоне

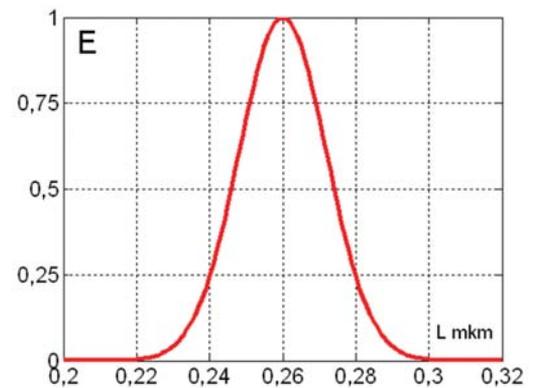


Рис. 3. Примерный график спектральной плотности распределения энергии, воспринимаемой УФ-детектором двухспектральной УФ-камеры

240–280 нм. При этом максимальная чувствительность соответствует 260 нм. На рис. 3 представлен примерный график спектральной плотности распределения энергии, воспринимаемой УФ-детектором двухспектральной УФ-камеры [4]. Величина энергии показана в относительном виде от 0 до 1.

Анализ графиков на рис. 2 и 3 позволяет выявить следующее. В рабочем диапазоне камеры 240–280 нм влияние солнечной радиации минимально, однако и мощность УФ-излучения короны достаточно мала (особенно по сравнению с диапазоном от 320 до 360 нм, где мощность излучения короны в несколько раз выше, чем при 240–280 нм). Вместе с тем, как следует из графика на рис. 3, детектор камеры при длине волны от 280 до 320 нм (так называемый расширенный УФ-диапазон спектра UVb) имеет хотя и низкую, но все же вполне определенную чувствительность.

### Оптические характеристики и пространственное разрешение УФ-системы

Для УФ и видимого диапазонов спектра электромагнитного излучения справедливы законы геометрической оптики. В стандартной комплектации двухспектральная камера DayCorII со встроенным объективом имеет углы обзора в вертикальной (V) плоскости — 3,75 градуса, а в горизонтальной (H) плоскости — 5,0 градуса. При этом формат изображения (V×H) в зависимости от расстояния до объекта L рассчитывается с помощью выражений:

$$V = 0,066 \times L \text{ м и } H = 0,088 \times L \text{ м.}$$

При размере УФ-детектора камеры 752 × 582 элементов пространственное разрешение УФ-изображения (минимально различимый элемент изоляции) имеет размеры:

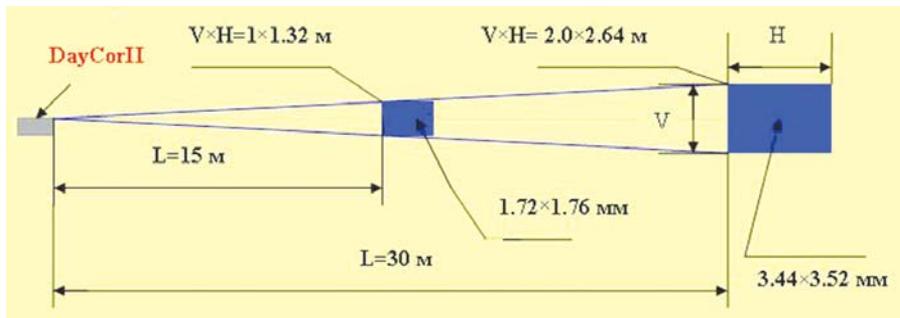


Рис. 4. Геометрические характеристики УФ-системы при стандартной оптике 3,75 × 5,0 градуса

$$v = V/582 \text{ мм и } b = H/752 \text{ мм.}$$

На рис. 4 представлены геометрические характеристики системы при стандартной оптике 3,75 × 5,0 градуса. Анализ характеристик показывает, что на расстоянии  $L = 15$  м формат изображения  $V \times H = 1,0 \times 1,32$  м, а минимально различимый элемент изоляции имеет размер  $v \times b = 1,72 \times 1,76$  мм. Однако в такой формат изображения, как  $V \times H = 1,0 \times 1,32$  м, практически не вписывается даже одна гирлянда из трех подвесных изоляторов. При удвоении дистанции до  $L = 30$  м соответствующие оптические характеристики пропорционально увеличатся и составят  $V \times H = 2,0 \times 2,64$  м и  $v \times b = 3,44 \times 3,52$  мм соответственно.

Вместе с тем увеличение дистанции  $L$  связано со снижением эффективности УФ-системы. Поскольку размер ПЧР, возникающего вследствие дефекта изоляции, много меньше расстояния  $L$ , то ПЧР можно считать точечным источником УФ-излучения. Тогда плотность потока УФ-излучения  $E$  как отношение энергии  $W$  через единицу площади  $S$  (в данном случае площади сферы) в единицу времени  $\tau$  по определению будет равна:

$$E = W/(S\tau),$$

$$E = W / (4\pi \times L^2 \times \tau)$$

или  $E \sim 1/L^2$ .

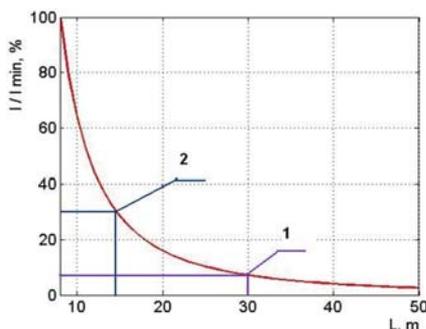


Рис. 5. График снижения относительной чувствительности объективов УФ-камеры: 1 — для стандартного объектива 3,75 × 5,0 градуса и дистанции  $L = 30$  м; 2 — для внешнего объектива 7,5 × 10,0 градуса и дистанции 15 м.

Последнее выражение означает, что плотность потока УФ-излучения  $E$  от ПЧР убывает обратно пропорционально квадрату расстояния  $L$  (рис. 5). Этот важный вывод означает следующее. Если изолятор наблюдается с оптимального расстояния 7–8 м (что обеспечивает обнаружение минимального ПЧР 1,5–2,0 пКл), то при  $L = 15$  м чувствительность УФ-камеры уменьшается в 4 раза и можно будет различить ПЧР только в 6–8 пКл. При  $L = 30$  м чувствительность УФ-камеры уменьшается примерно в 16 раз. Вместе с тем, как следует из рис. 5, при стандартной оптике (3,75 × 5,0 градуса) только с дистанции  $L = 30$  м можно получить минимально приемлемый формат изображения ( $V \times H$ ) = 2,0 × 2,64 м, в который вписывается одновременно как подвесная, так и фиксаторная (или консольная) изоляция. Однако снижение при этом в 16 раз чувствительности УФ-камеры резко снижает вероятность обнаружения дефектов изоляции, особенно на ранней стадии их развития.

Улучшить ситуацию позволяет установка на DayCorII дополнительного (внешнего) объектива с удвоенными углами обзора 7,5 × 10 градусов (рис. 6). В этом случае обеспечивается формат изображения объекта ( $V \times H$ ) = 2,0 × 2,64 м уже на дистанции  $L = 15$  м с потерей максимальной чувствительности не в 16, а, как следует из рис. 5, всего в 4 раза. При этом пространственное разрешение

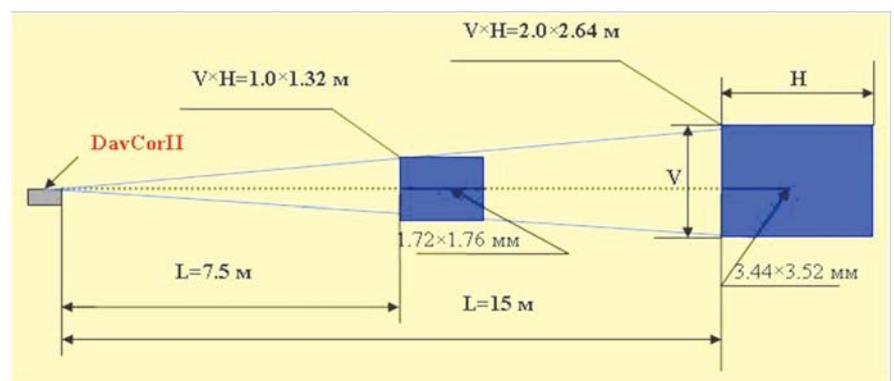


Рис. 6. Геометрические характеристики УФ-системы при установленном дополнительном (внешнем) объективе с удвоенными углами обзора 7,5 × 10 градусов

УФ-системы останется вполне приемлемым и составит 3,44 × 3,52 мм. Распознавания на изоляторе ПЧР такого размера для практики УФ-обследований вполне достаточно. Однако установка дополнительной внешней оптики связано со значительными финансовыми затратами.

### Двухспектральные электронно-оптические дефектоскопы последнего поколения

За последние полтора-два года на мировом рынке приборов неразрушающего контроля появились новейшие мобильные двух- и трехспектральные дефектоскопы фирмы CSIR-UVIRCO (ЮАР) типа CoroCAM. Их основное отличие от УФ-камер более раннего поколения типа DayCorII фирмы Ofil (Израиль) заключается в повышенной чувствительности, увеличенных углах поля зрения со встроенным объективом, наличии развитых цифровых портов, автономности цифровой записи информации с оптических и аудиоканалов. Малые масса и габариты, низкое энергопотребление и эргономичность дают возможность использования дефектоскопов фирмы CSIR-UVIRCO для диагностирования изоляции КС как с ВИКС, так и при пешеходных обходах.

В таблице 1 представлены основные характеристики двухспектральной УФ-камеры CoroCAM504. Для сравнения здесь же показаны основные характеристики УФ-камеры DayCorII.

Одной из важнейших характеристик УФ-камер является их надежность и безотказность. Шестилетний опыт эксплуатации DayCorII в ОАО «РЖД» показал, что из 16 закупленных камер 3 (на Горьковской, Красноярской и Иркутской железных дорогах) имели отказы, требующие серьезного заводского ремонта. Оценка вероятности безотказной работы при этом составляет около 80 %, что явно недостаточно для обеспечения надежности эксплуатации КС. Из 46 серийных единиц камеры CoroCAM504 только

**Таблица 1. Сравнительные характеристики двухспектральных УФ-камер CoroCAM504 и DayCorII для мобильной диагностики изоляции КС на базе ВИКС**

Технические характеристики		CoroCAM504	DayCorII
Максимальная чувствительность на дистанции 8 м	День (с солнечным фильтром)	$3 \times 10^{-18}$ Вт/см <sup>2</sup>	$3 \times 10^{-18}$ Вт/см <sup>2</sup>
	Ночь (без фильтра)	$1 \times 10^{-18}$ Вт/см <sup>2</sup>	Нет
Режим накопления сигнала (усреднения и усиления)		Есть	Есть
Автофокус, автоэкспозиция		Есть	Есть
Угол поля зрения, градусов		8×6	5×3,75
Цифровой интерфейс		USB	Нет
		RS232	Нет
		RS485	Нет
Выход	Видео	PAL/NTSC	PAL/NTSC
	Аудио	Есть	Нет
Встроенный цифровой регистратор		Есть	Нет
Оптический zoom	Видеоканал	25×	18×
	УФ-канал	Есть	Нет
Энергопитание	Сетевой адаптер 220/7,2 В	Есть	Есть
	Аккумулятор	Встроенный Li-on	Внешний Ni-Cad
	Время непрерывной работы, час	2,5	1,0
Масса, кг		2,3	7,7
Габариты, мм		302×165×125	275×175×180
Надежность	Число отказов/ед. камер	1/46	3/16
	Количество отказов, %	2,2	19

**Таблица 2. Сравнительные характеристики двухспектральных УФ-камер CoroCAM6D и UVolley для ВЭТЛ и пешеходов изоляции КС**

Технические характеристики		CoroCAM6D	UVolley
Максимальная чувствительность на дистанции 8 м	День (с солнечным фильтром)	$3 \times 10^{-18}$ Вт/см <sup>2</sup>	$3 \times 10^{-17}$ Вт/см <sup>2</sup>
	Ночь (без фильтра)	—	—
Режим накопления сигнала (усреднения и усиления)		Есть	Нет
Просмотр изображений		Цветной ЖК-дисплей 5,7" 640×480 px	Ч/б ЖК-дисплей 3,5" 320×240 px
Угол поля зрения, градусов		8×6	8×6
Автономная запись информации	Стоп-кадр	Есть	Есть
	Аудио	Есть	Нет
Цифровой интерфейс (включая возможность дистанционного управления — ДУ)		USB	Нет
		RS232	Нет
		(ДУ-опция)	Нет
Оптический zoom		10×	Нет
Масса с аккумулятором, кг		1,4	1,3
Габариты, мм		220×160×80	280×100×70
Автономность работы, час		2	0,5

одна имела несущественный дефект, который был устранен на месте. При этом оценка ее вероятности безотказной работы существенно выше и составляет 97 %. В значительной степени это объясняется новейшей элементной базой и современными технологиями, которые использовал для изготовления CoroCAM504 ее разработчик и производитель.

Несмотря на возможность применения CoroCAM504 на ВИКС, вагонах —

электротехнических лабораториях (ВЭТЛ), а также в режиме пешеходов изоляции КС, фирма CSIR-UVIRCO предлагает для автономного использования еще одну — малогабаритную модель CoroCAM6D. Она более удобна и эргономична для ручного использования, имеет откидной цветной ЖК-дисплей. В *таблице 2* перечислены ее основные характеристики в сравнении с характеристиками камеры UVolley фирмы Ofil.

\*\*\*

Опыт эксплуатации системы УФ-диагностики изоляции КС показывает, что большая часть дефектов изоляции обнаруживается путем пешеходов КС. На долю ВИКС приходится в среднем менее 25 % от всего числа обнаруживаемых дефектных изоляторов. Одной из основных причин недостаточной достоверности мобильной диагностики является низкая чувствительность УФ-системы при отсутствии возможности использо-

вания режима накопления диагностического сигнала при движении ВИКС.

Одним из путей повышения достоверности УФ-системы диагностики на базе ВИКС и снижения количества пропущенных дефектов является расширение спектрального диапазона наблюдения с 240–280 до 240–320 нм.

Кроме того, достоверность диагностирования повышается за счет использования благоприятных внешних факторов, значительно увеличивающих мощность потока излучения ПЧР и короны на дефектных изоляторах. Эффективность диагностирования существенно повышается при проведении УФ-обследований в жаркую влажную погоду, в условиях тумана, небольших дождевых и снежных осадков.

Аппаратная реализация расширенного спектрального диапазона реализована в УФ-камере CoroCAM504 фирмы CSIR-UVIRCO (ЮАР). По своей чувствительности, которая при ночном режиме составляет  $E_{\min} = 1,0 \times 10$  Вт/см, она в 3 раза превосходит камеру DayCorII. Данная характеристика значительно повышает достоверность УФ-диагностики изоляции КС, особенно с мобильного носителя — ВИКС.

Обследования изоляции КС, трансформаторных, тяговых подстанций и воздушных линий электропередачи, не попадающих в поле зрения при обследованиях с ВИКС, выполняются с ВЭТЛ и в режиме пеших обходов. Для этого наиболее целесообразно использовать малогабаритную камеру CoroCAM6D. Она имеет основные характеристики CoroCAM504 и несколько упрощенный интерфейс. От камеры UVolley фирмы Ofil она отличается большей чувствительностью, наличием оптического зума, опций режима накопления сигнала, аудиозаписи, большей автономностью энергоснабжения. Благодаря перечисленным характеристикам камера CoroCAM6D является оптимальной для широкого использования в масштабах ЭЧ железных дорог. Кроме того, камера отличается сравнительно низкой стоимостью, существенно зависящей от масштаба серийной закупки.

В отличие от камер DayCorII и UVolley камеры типа CoroCAM имеют широкий набор цифровых интерфейсов, что позволяет вывести УФ-систему диагностики на новый программно-алгоритмический уровень.

Практическая аппаратно-программная и организационно-техническая

реализация представленных методов и средств УФ-диагностики будет способствовать дальнейшему повышению надежности и эффективности эксплуатации электроизоляции оборудования и систем в хозяйстве электроснабжения ОАО «РЖД».

ЛИТЕРАТУРА

1. Скороходов Д. А., Плотников Ю. И., Герасимов В. П. [и др.] Перспективы создания компьютеризированной системы диагностирования изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению // Железные дороги мира. — 2004. — № 7. — С. 50–53.
2. Хананов В. В., Мизинцев А. В., Плотников Ю. И. [и др.] Мобильная система диагностики изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению // Железные дороги мира. — 2006. — № 9.
3. Плотников Ю. И. Точность и достоверность контроля при тепловизионном диагностировании оборудования электрифицированных линий // Железные дороги мира. — 2006. — № 3.
4. Stolper R., J. Hart J., Mahatho N. The design and evaluation of a Multi-Spectral Imaging Camera for the inspection of transmission lines and substation equipment // Applied Optics 11. — 2006. — CSIR, South Africa.