

УДК 681.7.068

Влияние геометрических факторов на эффективность регистрации электрической искры волоконным датчиком с люминесцентной оболочкой

© 2020 г. **Д. С. Агафонова***, канд. техн. наук, **А. И. Сидоров***, **, доктор физ.-мат. наук

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

**Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: dsagafonova@gmail.com

Поступила в редакцию 02.07.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-02-76-81

Представлены результаты численного моделирования эффективности регистрации электрической искры волоконным датчиком со спектральным преобразованием излучения. Показано, что использование защитной стеклянной трубки в чувствительном элементе датчика позволяет уменьшить влияние расфокусировки излучения и увеличения захвата излучения при увеличении диаметра цилиндрической линзы. Это приводит к повышению эффективности регистрации искры. При этом толщина трубки оказывает слабое влияние и может быть выбрана исходя из механических свойств, обеспечивающих достаточную прочность чувствительного элемента датчика. Показано, что при фиксированном числе каналов чувствительного элемента датчика увеличение расстояния между каналами приводит к падению углового разрешения, но также приводит к увеличению угла обзора всего чувствительного элемента датчика.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, люминесценция, электрическая искра.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2370.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке систем аварийной защиты высоковольтного и электrorаспределительного оборудования при возникновении электрического искрения или электрической дуги встаёт задача индикации этого искрения или дуги, определения их местоположения и мощности. В механических устройствах может возникать искрение за счёт трения или ударов механических узлов, что увеличивает их износ, может приводить к аварийным ситуациям и пожару или взрыву в присутствии легковоспламеняющихся веществ. Задача индикации искрения и электрической дуги возникает на электростанциях, в высоковольтных установках, на линиях электропередачи, на пожаро- и взрывоопасных предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности, в шахтах и на транспорте.

Фотоэлектронные устройства, основанные на непосредственной регистрации излучения искры фотоприёмником [1], обладают существенными

недостатками — существует вероятность их ложного срабатывания в условиях сильных электромагнитных помех и электрического пробоя при высокой напряжённости электрических полей в высоковольтных установках. Волоконно-оптические датчики лишены этих недостатков, так как оптический сигнал нечувствителен к электромагнитным помехам, а чувствительный элемент датчика может быть полностью изготовлен из диэлектрических материалов.

Существует ряд волоконно-оптических датчиков электрической дуги, в которых используется преобразование излучения, падающего на боковую поверхность полимерного волокна или оптоволоконного жгута в волноводные моды [2–7]. Такое преобразование происходит за счёт рассеяния падающего излучения на оптических неоднородностях волокна, поэтому оно крайне неэффективно. В работах [8, 9] для повышения эффективности регистрации искры было предложено использовать люминесцентные волокна, в которых проис-

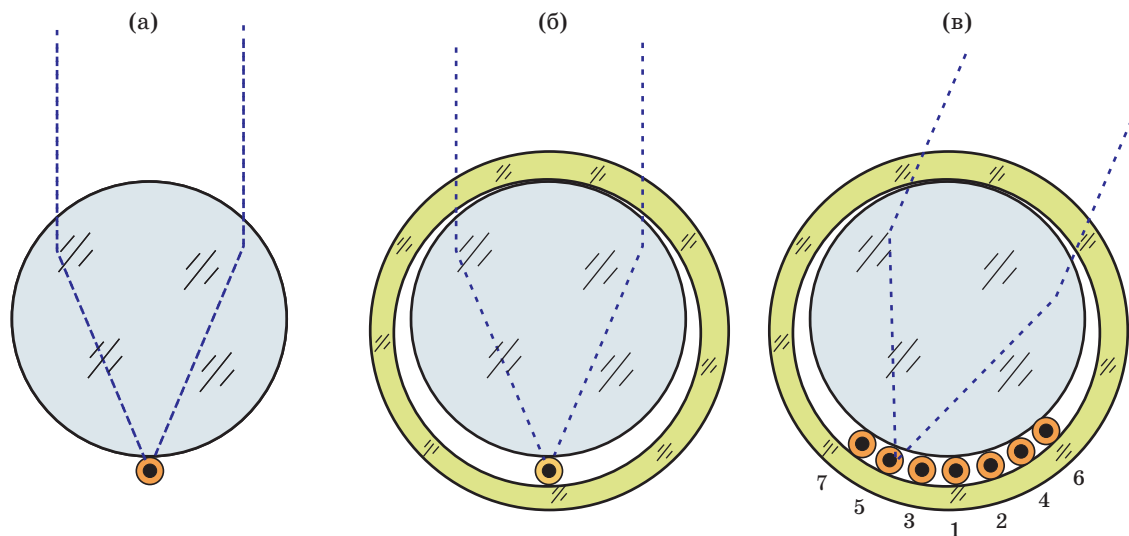


Рис. 1. Поперечное сечение ЧЭД. (а) Упрощённый вариант, (б) с защитной трубкой из стекла, (в) позиционно-чувствительный (1–7 — номера каналов).

ходит спектральное преобразование ультрафиолетового (УФ) излучения искры в видимую область спектра — область чувствительности кремниевых фотодиодов. Для дальнейшего повышения эффективности регистрации искры и уменьшения габаритов датчика в работах [10–12] было предложено использовать цилиндрическую линзу в виде стеклянного стержня круглого сечения, фокусирующую излучение искры на люминесцентное волокно. Простейший вариант конструкции чувствительного элемента датчика такого типа показан на рис. 1а. Основным его недостатком является то, что люминесцентное волокно не защищено от механических и других внешних воздействий. Очевидным решением данной проблемы является размещение цилиндрической линзы и волокна в стеклянной трубке (см. рис. 1б). Однако введение в конструкцию чувствительного элемента датчика (ЧЭД) дополнительного оптического элемента (трубки) может влиять на эффективность сбора излучения на волокне и, в конечном счёте, на эффективность регистрации искры.

Как показано в [11, 12] при размещении по периметру цилиндрической линзы нескольких люминесцентных волокон (см. рис. 1в) появляется возможность регистрировать пространственное положение искры по одной координате. В этом случае возникает вопрос, каким может быть угловое разрешение такого ЧЭД, и какие факторы могут влиять на данный параметр?

Целью данной работы было изучение влияния геометрических факторов на эффективность регистрации электрической искры волоконным датчиком со спектральным преобразованием излучения, а также определение факторов, влияющих на его угловое разрешение.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование проводилось с использованием программы «Zemax» в непоследовательном режиме (Non-Sequential Mode), который учитывает фактическое расположение объектов (в том числе, пропуск преломляющих объектов для разных траекторий лучей, например, оптических волокон) и многократные переотражения. При моделировании задавалось число лучей, равное не менее 10^8 . Влияние рассеяния излучения не учитывалось. Расчёты проводились для длин волн 400, 450 и 500 нм одновременно.

Для полного анализа влияния геометрии необходимо учесть следующее: дополнительные потери излучения за счёт неполной фокусировки излучения в объёме люминесцентного волокна (фактор нефокусировки f), потери за счёт переотражений внутри трубки (фактор пропускания при наличии трубки T_t), а также увеличение доли захваченного излучения при увеличении геометрических размеров ЧЭД при постоянной его освещённости (фактор концентрирования потока A). Фактор f был определён как доля мощности детектируемого излучения P_f , приходящаяся на внутренний объём люминесцентного волокна по отношению к общей мощности излучения, дошедшей до волокна P_2 (плоскость 2 на рис. 2).

$$f = P_f/P_2.$$

Для ЧЭД, содержащего трубку, фактор T_t был определён как доля детектируемого излучения P_{f2} , прошедшего без поглощения через систему линза-трубка в область расположения люминесцент-

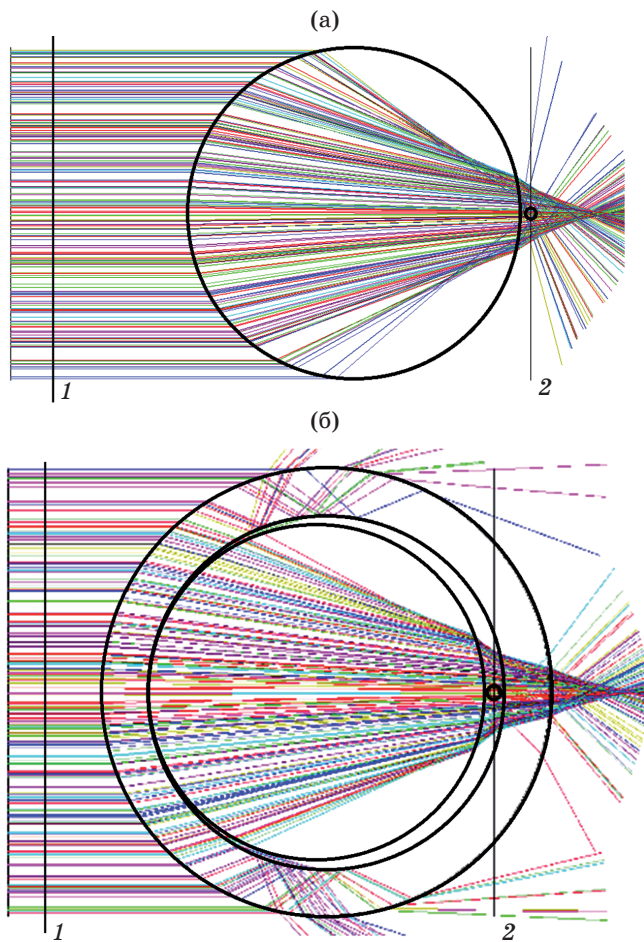


Рис. 2. Ход лучей в цилиндрической линзе ЧЭД без стеклянной трубки (а) и со стеклянной трубкой (б). 1 — плоскость детектора, измеряющего мощность P_1 , 2 — плоскость расположения люминесцентного волокна.

ного волокна по отношению к падающему на ЧЭД коллимированному излучению P_1 (плоскость 1 на рис. 2).

$$T_t = P_f / P_1.$$

Фактор концентрирования потока был определен как

$$A = d_t / d_f,$$

где d_t — диаметр трубки для ЧЭД с трубкой или $d_t = d$ для ЧЭД без трубки, d_f — диаметр люминесцентного волокна ($d_f = 250$ мкм).

Для суммарного учёта влияния описанных факторов был введён геометрический фактор

$$G = (T_t f A) / 100,$$

учитывающий геометрические параметры ЧЭД, а также фактор потерь

$$C = G(T/100),$$

учитывающий также поглощение в трубке и цилиндрической линзе. Для адекватного подсчёта параметра G величины f и A были нормированы. В приведённых выше формулах для G и C параметры T и T_t измеряются в %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изготовления оптических элементов ЧЭД может быть использовано широко применяемое в оптике оптическое силикатное стекло К8, прозрачное для $\lambda > 350$ нм. Однако ряд спектральных линий электрического разряда между металлическими контактами лежит в более коротковолновой области спектра [13]. Поэтому для повышения эффективности детектирования искры требуется расширение спектрального диапазона функционирования ЧЭД в область меньших длин волн. Для этого может быть использовано оптическое кварцевое стекло КУ-1, имеющее высокое пропускание для $\lambda > 200$ нм. На рис. 1 показан расчётный ход лучей в цилиндрической линзе без стеклянной трубки и со стеклянной трубкой. Из рисунка видно, что при использовании защитной стеклянной трубки происходит потеря излучения на краях пучка из-за переотражения в стенках трубки. В то же время, как будет показано ниже, использование трубки в ЧЭД позволяет уменьшить влияние расфокусировки излучения.

В табл. 1 и 2 приведены расчётные значения эффективности использования потока излучения для ЧЭД двух типов. С увеличением диаметра линзы пропускание T ЧЭД обоих типов уменьшается в связи с увеличением поглощения в линзе и трубке. При этом для ЧЭД с трубкой параметр T_t увеличивается с ростом диаметра линзы при фиксированной толщине трубки. Это обусловлено тем, что меньшее число лучей выходит из ЧЭД через трубку. Вариация параметров T и T_t лежит в пределах 5%. Существенно зависят от диаметра линзы параметры f и A . Рост A связан с большей приёмной площадью ЧЭД, что обеспечивает в итоге большую мощность оптического сигнала в плоскости 2 на рис. 2. Одновременно с этим происходит уменьшение параметра f в 2 и в 3,4 раза для ЧЭД с трубкой и без неё соответственно. При этом, трубка уменьшает расфокусировку излучения.

Для совместного анализа перечисленные выше факторы были объединены в геометрический фактор G и общий фактор потерь C , которые позволяют сравнить разные конструкции и вариации их размеров. Чем больше значение параметра G , тем выше эффективность сбора излучения ЧЭД с учётом только геометрических факторов. Фактор потерь C учитывает полную эффективность ЧЭД с учётом поглощения. Для ЧЭД без трубки параметр $T_t = 1$.

Таблица 1. Влияние геометрии ЧЭД без трубки на эффективность использования потока излучения

Диаметр линзы d , мм	Среднее пропускание ЧЭД T , %	Нормированный фактор нефокусировки f , отн. ед.	Фактор концентрирования потока A
2	97,1	1,00	16
5	96,4	0,71	20
6	95,7	0,55	24
7	95,0	0,45	28
8	94,4	0,38	32
9	93,7	0,33	36
10	93,0	0,29	40

Таблица 2. Влияние геометрии ЧЭД с трубкой на эффективность использования потока излучения (толщина трубки $h = 1,2$ мм)

Диаметр линзы d , мм	Среднее пропускание ЧЭД T , %	Фактор пропускания при наличии трубки T_t , %	Нормированный фактор нефокусировки f , отн. ед.	Фактор концентрирования потока A
2	96,3	76,1	1,00	28
5	95,6	76,2	0,84	32
6	94,9	77,0	0,73	36
7	94,2	77,9	0,65	40
8	93,5	79,0	0,59	44
9	92,9	80,4	0,54	48
10	92,2	81,1	0,49	52

Полученные результаты в зависимости от диаметра цилиндрической линзы представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что для ЧЭД без трубки увеличение диаметра линзы приводит к уменьшению эффективности использования падающего потока. При изменении диаметра линзы от 4 до 10 мм эффективность потока изменяется примерно на 30%. Уменьшение геометрического фактора G с ростом диаметра линзы обусловлено более эффективным ростом потерь на расфокусировку излучения по отношению к увеличению доли собранного излучения.

Для ЧЭД с трубкой геометрический фактор G изменяется на 5,1% при увеличении диаметра линзы от 4 до 10 мм. При этом зависимость имеет немонотонный характер. Возрастание данной зависимости при диаметре линзы от 8 до 10 мм (что нехарактерно для ЧЭД без трубки) обусловлено увеличением фактора T_t . По этой же причине на зависимостях фактора потерь C в этом же диапазоне происходит компенсация возрастания потерь на поглощение излучения, и зависимости $C(d)$ имеют практически пологий характер для $d = 6-10$ мм (изменение не более 0,5 %). Сказанное выше справедливо для фиксированной толщины трубки. При этом диаметр самой трубки зависит от диа-

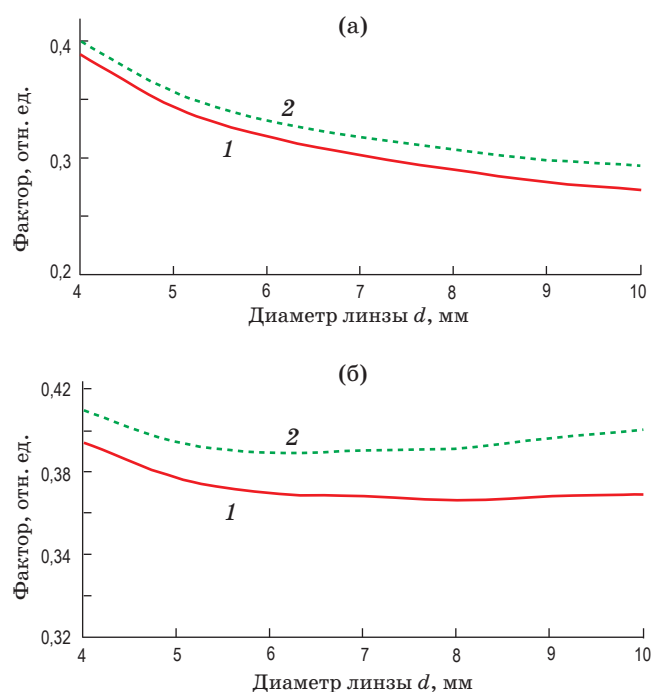


Рис. 3. Зависимость геометрического фактора G (2) и фактора потерь C (1) от диаметра цилиндрической линзы d для ЧЭД без трубки (а), с трубкой (толщина трубки равна 1,2 мм) (б).

метра линзы. Проведённые расчёты показали, что вариация толщины трубки слабо сказывается на геометрическом факторе G . Больше влияние на этот параметр оказывает изменение поглощения в линзе. Соответствующие значения среднего пропускания T ЧЭД показаны на рис. 4. Из рисунка видно, что параметр T изменяется на 0,9–1% при увеличении толщины трубки от 0,3 до 1,5 мм.

Из проведённого анализа можно сделать следующие выводы: использование трубки в ЧЭД позволяет уменьшить влияние расфокусировки излучения и увеличения поглощения излучения при увеличении диаметра цилиндрической линзы. При этом толщина трубки с точки зрения её оптических свойств имеет малое значение и может быть выбрана исходя из механических свойств, обеспечивающих достаточную механическую прочность ЧЭД.

Разрабатываемые конструкции ЧЭД должны обеспечивать не только заданный порог чувствительности, но и обеспечивать заданную угловую диаграмму чувствительности. Например, если стоит задача зафиксировать акт возникновения электрического разряда в некотором объёме, то для такой задачи может быть использован один ЧЭД с углом обзора вплоть до 360° . В ряде случаев при детектировании электрического разряда может возникать задача – значительно сузить угол обзора для регистрации события в заданном телесном угле. Ранее было показано [11, 12], что конструкция ЧЭД, показанная на рис. 1а, может обеспечивать узкую угловую диаграмму чувствительности (около 15°). Однако функциональность такого ЧЭД может быть расширена путём введения дополнительных люминесцентных волокон в ЧЭД по периметру цилиндрической линзы, как показано на рис. 1в. Такой ЧЭД будет осуществлять позиционно-чувствительную регистрацию излучения электрического разряда, и будет заменять собой комплект точечных ЧЭД, используемых для локализации источника разряда. Угловая разрешающая способность такого многоканального ЧЭД будет определяться угловой диаграммой чувствительности ЧЭД.

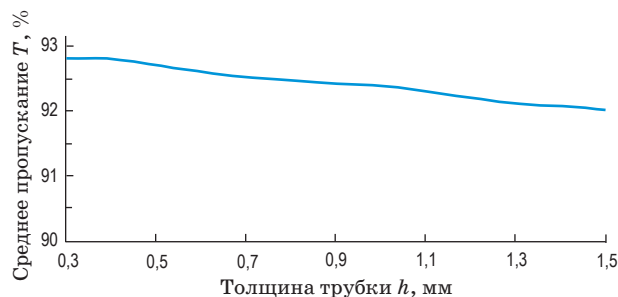


Рис. 4. Влияние толщины трубки ЧЭД на пропускание излучения (диаметр линзы $d = 10$ мм).

Для расчёта угловой диаграммы чувствительности было проведено моделирование распространения излучения через ЧЭД при различных углах падения детектируемого излучения. При этом, под углом падения излучения понимается угол между нормалью к источнику и ЧЭД. Параметры источника, использованные при моделировании, – геометрический размер 2×2 см, полный угол расходимости излучения 30° , удаление от ЧЭД равно 30 см.

На рис. 5 показаны рассчитанные угловые характеристики чувствительности ЧЭД по каналам. Из рисунка видно, что каждому каналу соответствует пик интенсивности излучения, причём для разных каналов пики разнесены по шкале углов падения. Помимо основного максимума каждому каналу соответствуют два боковых пика значительно меньшей интенсивности. Наличие боковых пиков может быть обусловлено дифракцией на линзе. Следует сказать, что данный эффект может быть полезным при определении соответствующего направления на источник излучения при определённом алгоритме обработки данных со всех каналов. Особенностью данной угловой характеристики чувствительности ЧЭД также является то, что пики от разных каналов не пересекаются выше уровня порядка $1/3$ от максимального значения.

В процессе расчёта было выяснено, что на угловую характеристику ЧЭД в значительной степени влияет расстояние между люминесцентными волокнами. Поэтому построены и проанализированы угловые характеристики ЧЭД для разного расстояния между волокнами. Результаты расчёта приведены в табл. 3. Следует отметить, что качественно характеристики одинаковы, однако изменяются такие важные количественные показа-

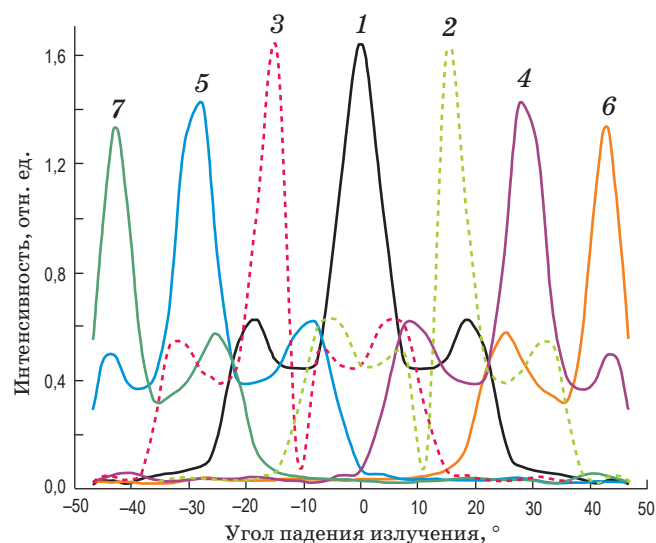


Рис. 5. Угловая характеристика чувствительности различных каналов ЧЭД для конструкции, показанной на рис. 1в.

Таблица 3. Влияние взаимного расположения волокон на угловые характеристики ЧЭД

Расстояние между волокнами, мм	Среднее расстояние между положением максимумов, градусы	Средняя ширина пика по уровню 0,5, градусы
0,4	5	10
0,6	9	11
0,8	11	10
1,0	14	10
1,2	17	12

тели как положение максимумов на шкале углов падения и ширина пика на полувысоте. Из таблицы видно, что при увеличении расстояния между волокнами до 3 раз максимумы характеристик отодвигаются друг от друга, среднее расстояние между положением максимумов увеличивается в 3,4 раза. При этом средняя ширина пиков изменяется на несколько градусов.

Описанная закономерность имеет важное практическое значение, поскольку угловое разрешение ЧЭД зависит от указанных параметров. В частности, при фиксированном числе каналов увеличение расстояния между каналами приводит к уменьшению углового разрешения, но также приводит к увеличению угла обзора всего ЧЭД. С другой стороны, высокое угловое разрешение при малом рас-

стоянии между волокнами приводит к сужению угла обзора и, следовательно, требует увеличения числа каналов для сохранения большого угла обзора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, численное моделирование показало, что использование защитной стеклянной трубки в ЧЭД позволяет уменьшить влияние расфокусировки излучения и увеличения поглощения излучения при увеличении диаметра цилиндрической линзы. Это приводит к повышению эффективности регистрации электрической искры. При этом, толщина трубки оказывает слабое влияние, и может быть выбрана исходя из механических свойств, обеспечивающих достаточную прочность ЧЭД.

Численное моделирование показало, что при фиксированном числе каналов ЧЭД увеличение расстояния между каналами приводит к уменьшению углового разрешения, но также приводит к увеличению угла обзора всего ЧЭД. С другой стороны, высокое угловое разрешение при малом расстоянии между волокнами приводит к сужению угла обзора и, следовательно, требует увеличения числа каналов для сохранения большого угла обзора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект 16.1651.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные средства релейной защиты и противоаварийной автоматики. Каталог спецэкспозиции. М.: Союзтехэнерго, 1989. 15 с.
2. Никитаев О.В., Селиванов А.У. Применение дуговых защит в комплексных распределительных устройствах сельскохозяйственных подстанций. Эксплуатация устройств сельскохозяйственного электроснабжения. Сборник научных трудов. М.: 1989. 44 с.
3. Казачков Ю.П. Устройство для отключения комплексных распределительных устройств // Патент России № 2096887. 1997.
4. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический датчик открытой электрической дуги // Патент России № 2237332. 2004.
5. Казачков Ю.П. Боковой захват оптического излучения волоконным световодом // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 20. С. 73–76.
6. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический распределенный позиционно-чувствительный датчик электрической дуги // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 145–147.
7. Казачков Ю.П. Определение местоположения светящейся области внутри волоконно-оптического жгута // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 107–110.
8. Lee C., Kalar K., Sallee B. et al. Fiber optic fluorescent sensor for electric discharge detection // The Conf. Mater. «Optical Fiber Sensors». Cancun, Mexico. 2006. P. TuC6.
9. Tang J., Zhou J., Zhang X. et al. A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber // Energies. 2012. V. 5. P. 1490–1502.
10. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Волоконный датчик искры и электрической дуги // Патент России № 2459222. 2012.
11. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Волоконно-оптический индикатор возникновения искры и дуги со спектральным преобразованием детектируемого излучения // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 11. С. 60–65.
12. Agafonova D.S., Kolobkova E.V., Ignatiev A.I. et al. Luminescent glass fiber sensors for ultraviolet radiation detection by the spectral conversion // Optical Engineering. 2015. V. 54. № 11. P. 117107-1-8.
13. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шредер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Гос. Изд. Физ.-мат. лит., 1962. 607 с.