

На правах рукописи

БОГОМОЛОВА Светлана Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

Специальность 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Москва
2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» Российской Федерации.

Научный руководитель: **Лукашов Юрий Евгеньевич**,
кандидат технических наук,
с.н.с. ФГУП «ВНИИМС»

Официальные оппоненты: **Данилов Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор, заместитель
директора ФБУ «Пензенский ЦСМ»

Гаврилов Валерий Рудольфович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заместитель начальника отделения по научной
работе ФГУП «ВНИИОФИ»

Ведущая организация: АО «НПП «Квант»

Защита диссертационной работы состоится «___» _____ 2016 г. в
___:___ на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС»
по адресу: 119361, Москва, ул. Озерная, д.46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Лысенко В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие промышленности и рост мировой экономики в конце XX - начале XXI вв. привели к существенному увеличению энергопотребления. Повышение уровня производства энергии преимущественно обеспечивалось за счет ископаемых источников – нефти, природного газа, угля, ядерного топлива. Однако, в настоящее время является очевидным тот факт, что данные источники не способны обеспечить дальнейший рост энергопотребления. Их использование негативно отражается на экологической обстановке отдельного государства и планеты в целом, кроме того, оскудение запасов традиционных источников в ближайшем будущем приведет к резкому удорожанию их использования. Ввиду указанных недостатков традиционных источников энергии во многих странах, в том числе и в Российской Федерации, уделяется большое внимание развитию возобновляемых источников энергии. Одним из самых перспективных возобновляемых источников является энергия солнечного излучения, которая преобразуется с использованием фотоэлектрических преобразователей в электрическую энергию.

С целью развития высокотехнологичной отрасли солнечной энергетики в Российской Федерации в 2009 г. была основана компания «Хевел», учредителями которой являются Группа компаний «Ренова» (51%) и ОАО «РОСНАНО» (49%). ООО «Хевел» стало первым в России производителем тонкопленочных фотоэлектрических модулей (ФЭМ) на основе аморфного и микрокристаллического кремния ($a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$). Производственный комплекс расположен в Чувашской Республике, в г. Новочебоксарск. Поставщиком технологии является компания “Oerlikon Solar”, оборудование которой предназначено для изготовления ФЭМ площадью $(1,1 \times 1,3) \text{ м}^2$; нанесение фоточувствительных слоев ФЭМ осуществляется методом плазмохимического газофазного осаждения. Фотоэлектрические модули являются важным элементом солнечных энергетических установок, при проектировании которых требуется точная и достоверная информация о значениях выходных фотоэлектрических параметров ФЭМ (тока короткого замыкания, напряжения

холостого хода, максимальной мощности и др.). Источником данной информации являются результаты выходного контроля качества фотоэлектрической продукции. Для его проведения разрабатываются системы контроля, которые объединяют в своей структуре технические устройства и организационные положения, предназначенные для получения результатов контроля с определенными показателями достоверности.

Необходимость разработки системы выходного контроля полноразмерных многопереходных ФЭМ определяет **актуальность** диссертационной работы.

Объектом исследования является выходной контроль полноразмерных многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам. **Предметом исследования** - достоверность результатов измерительного контроля ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам в производственных условиях.

Целью диссертационного исследования является разработка системы выходного контроля многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам в производственных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **основные задачи**:

1) сформировать структуру системы выходного контроля многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам и сформулировать требования к производительности, точности, достоверности системы контроля;

2) проанализировать производительность оборудования системы контроля с использованием методик и подходов теории массового обслуживания и определить значения характеристик производительности;

3) проанализировать источники неопределенностей (погрешностей) и оценить показатели точности измерений фотоэлектрических параметров при проведении выходного контроля качества многопереходных ФЭМ на производственной линии;

4) смоделировать процесс принятия решений при контроле и оценить показатели достоверности при заданных характеристиках распределений

вероятностей фотоэлектрических параметров и их неопределенностей, положении границ поля допуска;

5) проанализировать метрологическое обеспечение системы выходного контроля и выбрать метод калибровки имитатора солнечного излучения с учетом особенностей структуры и конструкции контролируемых ФЭМ;

6) провести экспериментальное исследование показателей точности измерений фотоэлектрических параметров и оценить неопределенности расчетно-экспериментальным методом;

7) оценить показатели достоверности результатов контроля опытной партии многопереходных ФЭМ и установить значения характеристик системы контроля многопереходных ФЭМ, обеспечивающие заданную достоверность результатов контроля.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1) Впервые разработана система выходного контроля тонкопленочных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам в производственных условиях: установлены значения ее основных показателей качества: «надежность», «производительность», «точность», «достоверность».

2) Проведен анализ источников неопределенностей измерений фотоэлектрических параметров полноразмерных многопереходных ФЭМ в производственных условиях, получены оценки суммарных неопределенностей измерений.

3) Проведен анализ производительности оборудования системы контроля с использованием методик и подходов теории массового обслуживания и определены значения характеристик производительности («максимальное количество ФЭМ в очереди», «коэффициент занятости имитатора») при текущей интенсивности поступления ФЭМ на контроль и в случае увеличения объема производства.

4) Определены основные статистические характеристики, описывающие распределения вероятностей результатов измерений фотоэлектрических параметров опытной партии многопереходных ФЭМ.

5) Получены оценки показателей сходимости и воспроизводимости процесса измерения фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ на имитаторе солнечного излучения.

6) Смоделирован процесс принятия решений при многопараметрическом контроле ФЭМ, установлены зависимости показателей достоверности (вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода) от величины неопределенности измерений, положения границ поля допуска.

Практическая ценность работы заключается в том, что в результате проведенных исследований:

1) Определены основные показатели качества системы выходного контроля тонкопленочных ФЭМ.

2) Составлены бюджеты неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ на основании теоретических (справочных) и экспериментальных данных.

3) Выбрана и апробирована методика калибровки импульсного имитатора солнечного излучения по энергетической освещенности, учитывающая особенности структуры и конструкции контролируемых ФЭМ.

4) Разработана и апробирована методика анализа сходимости и воспроизводимости процесса измерения фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ на имитаторе солнечного излучения.

Методы исследования. При проведении исследования использовались методы и подходы теории массового обслуживания, теории вероятностей и математической статистики, методы оценивания неопределенностей, имитационное моделирование.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Структура системы выходного контроля тонкопленочных ФЭМ, позволяющая учитывать влияние распределений вероятностей фотоэлектрических параметров и их неопределенностей на достоверность результатов контроля в производственных условиях.

2) Имитационная модель системы допускового контроля, которая позволила оценить показатели производительности («максимальное количество ФЭМ в очереди», «коэффициент занятости оборудования») при текущем объеме производства (интенсивности поступления ФЭМ на контроль, равной 25 ФЭМ/час) и выявить потенциал для повышения загрузки оборудования.

3) Модели расширенных неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ, которые определяют вклады оптических, электрических, температурных, «эталонных» составляющих. Установлено, что уменьшение суммарных неопределенностей фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ в производственных условиях возможно за счет снижения вкладов «эталонных» и оптических составляющих.

4) Аналитическая и имитационная модели, сформированные на основании характеристик распределений вероятностей фотоэлектрических параметров и их неопределенностей, положений границ полей допусков, которые позволили оценить и спрогнозировать значения показателей достоверности контроля многопереходных ФЭМ в производственных условиях. Сходимость результатов моделирования подтвердила пригодность имитационной модели для детального исследования достоверности результатов контроля многопереходных ФЭМ.

5) Метод калибровки импульсного имитатора солнечного излучения по энергетической освещенности с использованием двух ФЭМ (однопереходного и многопереходного), учитывающий структурные и конструктивные особенности контролируемых ФЭМ и оборудования, который позволил снизить вклады «эталонной» и оптической составляющих в бюджетах суммарных неопределенностей измерений фотоэлектрических параметров.

Достоверность полученных результатов следует из адекватности и корректности примененных в работе теоретических методов и сравнения теоретических результатов с результатами компьютерного моделирования и экспериментального оценивания.

Апробация работы. На различных этапах исследования результаты работы докладывались на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов

«Будущее машиностроения России» (г. Москва), Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (г. Москва), Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения» (г. Казань), Всероссийской конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения» (г. Чебоксары), 28-ой Европейской конференции по преобразованию солнечной энергии (г. Париж).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка в количестве 102 наименования и 6 приложений. Текст диссертации изложен на 150 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц, 23 рисунка.

Публикации по теме диссертации. Основные научные положения и результаты работы отражены в 17 печатных трудах, среди которых четыре опубликованы ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Дана оценка новизны и практической значимости полученных результатов, приведено краткое содержание работы.

В **первой главе** рассматриваются особенности контроля качества многопереходных ФЭМ. Установлены характеристики, определяющие качество системы контроля многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам.

Анализ объекта контроля показал, насколько важно учитывать особенности структуры и конструкции ФЭМ при разработке методов исследования их эффективности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Описаны особенности формирования спектральных и вольт-амперных характеристик (ВАХ) многопереходных ФЭМ на основе аморфного и микрокристаллического кремния (α -Si/ μ c-Si). Форма вольт-амперной характеристики многопереходного ФЭМ при его освещении является результатом

суперпозиции ВАХ отдельных субэлементов. Приведен перечень фотоэлектрических параметров, характеризующих эффективность преобразования солнечного излучения в электрическую энергию, определяемых при измерении ВАХ: ток короткого замыкания ($I_{к.з.}$); напряжение холостого хода ($U_{х.х.}$); максимальная мощность (P_{max}), сила тока (I_m) и напряжение (U_m) в точке максимальной мощности; коэффициент заполнения ВАХ (FF); коэффициент полезного действия (η).

Фотоэлектрические модули предназначены для выработки электрической энергии в составе солнечных станций, при проектировании которых необходима информация о номинальных значениях фотоэлектрических параметров и величинах полей допусков. Данные сведения обязан предоставить изготовитель фотоэлектрической продукции. На основании обзора технических характеристик тонкопленочных ФЭМ, предлагаемых ведущими производителями фотоэлектрической продукции, и анализа требований по обеспечению технической совместимости и взаимозаменяемости ФЭМ в составе солнечных энергетических установок, были установлены границы полей допусков для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ: для тока короткого замыкания – $(2,65 \pm 0,2)$ А; для напряжения холостого хода – (73 ± 6) В; для максимальной мощности – (130 ± 15) Вт.

С целью оценки значений фотоэлектрических параметров ФЭМ и принятия решения о соответствии (несоответствии) фотоэлектрических параметров допускам с заданной достоверностью (вероятность ошибок 2-го рода $P_{II} \leq 0,01$) в ООО «Хевел» возникла необходимость в разработке системы контроля, под которой понимают совокупность технических устройств и организационных положений, включающая решающие правила, направленных на получение результатов допускового контроля. В структуру системы контроля многопереходных ФЭМ входят испытательное оборудование (имитатор солнечного излучения) и программно-аппаратные средства Системы управления производственными процессами (СУПП), обеспечивающие анализ измерительной

информации и принятие решения о соответствии (несоответствии) ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам. Сформулированы требования к техническим характеристикам имитатора солнечного излучения (ИСИ), предназначенного для измерения нагрузочных ВАХ полноразмерных a -Si/ μ c-Si ФЭМ: допустимые отклонения энергетической освещенности (ЭО) и спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в рабочей области имитатора.

Для решения задач контроля технических изделий система контроля должна соответствовать определенным требованиям, которые предъявляются к ее основным характеристикам. Анализ различных характеристик систем контроля показал, что в качестве основных показателей качества системы контроля многопереходных ФЭМ следует выбирать «объем контроля», «надежность», «производительность», «точность», «достоверность», которые в совокупности характеризуют эффективность контроля. Таким образом, разработка системы выходного контроля многопереходных ФЭМ заключается в определении значений показателей производительности, точности, достоверности, при которых в процессе контроля не будут возникать очереди на технологической линии и будет обеспечена требуемая потребителем достоверность результатов контроля (вероятность ошибок 2-го рода $P_{II} \leq 0,01$).

Во **второй главе** представлены результаты оценивания расчетным методом единичных показателей качества системы выходного контроля многопереходных ФЭМ: «объем контроля», «надежность», «производительность», «точность».

Определение оптимального объема контроля заключается в выборе номенклатуры контролируемых параметров. На основании требований, предъявляемых к выходным характеристикам фотоэлектрической продукции, были определены фотоэлектрические параметры (ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальная мощность), по результатам контроля которых будет приниматься решение о соответствии (несоответствии) многопереходных ФЭМ своему функциональному назначению. Установлено, что осуществление контроля по трем параметрам не приводит к увеличению затрат на

получение измерительной информации, а также не влияет на производительность и надежность системы выходного контроля ФЭМ.

При анализе показателей надежности оборудования системы контроля была выявлена основная причина отказа ИСИ - исчерпание ресурса работы ламп. Система контроля была отнесена к группе ремонтируемых восстанавливаемых объектов, надежность которой можно охарактеризовать значениями следующих показателей: «среднее время наработки между отказами», «среднее время восстановления». Учитывая, что при трехсменном режиме работы ежедневно на одном ИСИ в среднем контролируют 600 ФЭМ и около шести измерений выполняют при инициализации ламп (настройке интенсивности излучения), то среднее время наработки между отказами составляет (3170 ± 30) часов. Для замены ламп, настройки и калибровка ИСИ требуется в среднем (8 ± 3) часа, что принимается за среднее время восстановления.

При анализе производительности системы контроля многопереходных ФЭМ использовались методологические подходы теории массового обслуживания. Разработана имитационная модель (алгоритм функционирования) двухканальной системы массового обслуживания (СМО); имитационная модель СМО описана в программной среде MATLAB. В результате многократной реализации алгоритма были получены значения показателей производительности («максимальное число ФЭМ в очереди», «коэффициент занятости ИСИ») при варьировании объема производства - интенсивности поступления ФЭМ на контроль: 20 ФЭМ/час, 25 ФЭМ/час, 30 ФЭМ/час, 40 ФЭМ/час, 50 ФЭМ/час. Установлено, что при реализуемой на предприятии технологии изготовления тонкопленочных ФЭМ (интенсивность поступления ФЭМ на контроль составляет 25 ФЭМ/час), максимальное число ФЭМ в очереди (Q_{maxC}) равно двум, а коэффициент занятости ИСИ (K_{zi}) - 0,18; увеличение объема производства в два раза (50 ФЭМ/час) не приводит к статистически значимому изменению указанных показателей производительности, значения которых сохраняются в допустимых пределах ($Q_{maxC} \leq 10$; $K_{zi} \leq 0,8$).

Оценивание показателей точности (неопределенности) результатов измерений фотоэлектрических параметров многопереходного ФЭМ выполнялось в соответствии с рекомендациями, изложенными в Руководстве по выражению неопределенности измерений. Для анализа и систематизации источников неопределенности измерений контролируемых фотоэлектрических параметров были построены причинно-следственные диаграммы Исикавы, на основании которых были выявлены основные источники неопределенности: «Образец», «Метод», «Оборудование», «Эталон», «Окружающая среда», «Персонал».

Сформированы выражения для определения результатов измерений фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ.

- Для тока короткого замыкания:

$$I_{к.з.} = I_{к.з.}^{\text{дейст.}} + \delta I_{к.з.}^{\text{эт.}} + 0,1 \cdot \delta MM + s \cdot \delta I_{NU} + \delta I_{TI} + \delta I_{\text{приб}} + \delta I_{ShR} + \alpha \cdot \delta T + \alpha \cdot \delta T_{\text{приб}} + \alpha \cdot \delta T_{NU}, \quad (1)$$

где $I_{к.з.}^{\text{дейст.}}$ – действительное значение тока короткого замыкания исследуемого ФЭМ; $\delta I_{к.з.}^{\text{эт.}}$ – отклонение результата измерения тока короткого замыкания исследуемого ФЭМ из-за неопределенности тока короткого замыкания эталонного ФЭМ, используемого при калибровке ИСИ; δMM – поправка, учитывающая спектральное несоответствие; δI_{NU} – отклонение результатов измерений тока короткого замыкания, связанное с неравномерностью распределения ЭО в рабочей области имитатора (оценивается с помощью мини-ФЭМ); δI_{TI} – отклонение результатов измерений тока короткого замыкания, связанное с нестабильностью ЭО во время измерения; $\delta I_{\text{приб}}$ – допустимая величина отклонения результата измерения тока короткого замыкания, связанная с погрешностью устройства для измерения ВАХ; δI_{ShR} – отклонение шунтирующего сопротивления в измерительной схеме для датчика освещенности; δT – допустимая величина изменения температуры во время измерения; $\delta T_{\text{приб}}$ – допустимая величина отклонения результата измерения температуры, связанная с погрешностью устройства для измерения температуры; δT_{NU} – допустимая величина отклонения результата измерения температуры, связанная

неоднородностью распределения температуры по поверхности модуля; α – температурный коэффициент тока короткого замыкания (для структуры на основе аморфного кремния составляет 0,06 %/°C); s – коэффициент площади (определяется как отношение площадей мини-ФЭМ и полноразмерного ФЭМ, $s = 0,01/1,40 = 0,007$).

- Для напряжения холостого хода:

$$U_{x.x.} = U_{x.x.}^{\text{дейст.}} + \ln(\delta I_{k.z.}^{\text{эт.}}) + \delta U_{\text{приб}} + \beta \cdot \delta T + \beta \cdot \delta T_{\text{приб}} + \beta \cdot \delta T_{NU}, \quad (2)$$

где $U_{x.x.}^{\text{дейст.}}$ – действительное значение напряжения холостого хода исследуемого ФЭМ; $\delta U_{\text{приб}}$ – допустимая величина отклонения результата измерения напряжения холостого хода, связанная с погрешностью устройства для измерения ВАХ; β – температурный коэффициент напряжения холостого хода (для структуры на основе аморфного кремния составляет -033 %/°C).

- Для максимальной мощности:

$$P_{\text{max}} = P_{\text{max}}^{\text{дейст.}} + \delta P_{\text{max},I_{k.z.}} + \delta P_{\text{max},U_{x.x.}} + \delta P_{\text{max},FF}, \quad (3)$$

где $P_{\text{max}}^{\text{дейст.}}$ – действительное значение максимальной мощности исследуемого ФЭМ; $\delta P_{\text{max},I_{k.z.}}$ – отклонение результата измерения максимальной мощности из-за неопределенности тока короткого замыкания исследуемого ФЭМ; $\delta P_{\text{max},U_{x.x.}}$ – отклонение результата измерения максимальной мощности из-за неопределенности напряжения холостого хода исследуемого ФЭМ; $\delta P_{\text{max},FF}$ – отклонение результата измерения максимальной мощности из-за неопределенности коэффициента заполнения ВАХ исследуемого ФЭМ.

В предложенных моделях измерений фотоэлектрических параметров принимается допущение об отсутствии корреляции между входными величинами.

Сформированы бюджеты неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров полноразмерных a -Si/ μ c-Si ФЭМ на ИСИ. Значения стандартных неопределенностей выходных величин оценивались на основании справочной информации о технических характеристиках ИСИ, свойствах исследуемого и эталонного ФЭМ, методе измерения ВАХ и др. (неопределенности по типу B в соответствии с ГОСТ Р 54500.3 - 2011). Оценены

значения суммарных стандартных неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров: для тока короткого замыкания – $\pm 1,77\%$; для напряжения холостого хода – $\pm 0,37\%$; для максимальной мощности – $\pm 1,84\%$. Полученные значения неопределенностей были использованы для расчета показателей достоверности контроля.

В третьей главе смоделирован процесс принятия решения при многопараметрическом контроле. Проанализированы зависимости показателей достоверности от стандартных неопределенностей фотоэлектрических параметров.

В качестве показателей достоверности контроля многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам были выбраны: вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим установленным требованиям при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет (вероятность ошибок 1-го рода, т.е. *годное* признается *бракованным*), $P_{\alpha-б}$; вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим установленным требованиям при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет (вероятность ошибок 2-го рода, т.е. *бракованное* признается *годным*), $P_{\beta-2}$.

В случае однопараметрического двухальтернативного контроля выходного фотоэлектрического параметра, для которого установлены нижняя и верхняя границы поля допуска, для вычислений $P_{\alpha-б}$ и $P_{\beta-2}$ используются следующие выражения:

$$P_{\alpha-б} = \int_{\Delta_H}^{\Delta_B} \varphi(\Delta_T) \left[\int_{\Delta_B - \Delta_T}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi \right] d\Delta_T + \int_{\Delta_H}^{\Delta_B} \varphi(\Delta_T) \left[\int_{-\infty}^{\Delta_H - \Delta_T} \varphi(\xi) d\xi \right] d\Delta_T, \quad (4)$$

$$P_{\beta-2} = \int_{\Delta_B}^{\infty} \varphi(\Delta_T) \left[\int_{\Delta_H - \Delta_T}^{\Delta_B - \Delta_T} \varphi(\xi) d\xi \right] d\Delta_T + \int_{-\infty}^{\Delta_H} \varphi(\Delta_T) \left[\int_{-\Delta_H - \Delta_T}^{\Delta_B - \Delta_T} \varphi(\xi) d\xi \right] d\Delta_T. \quad (5)$$

где $\varphi(\Delta_T)$ - плотность распределения вероятностей значений Δ_T (технологического отклонения контролируемого фотоэлектрического параметра от номинального значения); $\varphi(\xi)$ - плотность распределения вероятности неопределенности (погрешности) оценки контролируемого фотоэлектрического параметра; Δ_H , Δ_B - нижнее и верхнее допустимые отклонения фотоэлектрического параметра от номинального значения.

В соответствии с (4), (5) значения показателей достоверности контроля зависят от статистических характеристик распределения вероятностей контролируемого параметра и его неопределенности, величины поля допуска. При анализе достоверности контроля ФЭМ в качестве априорного был принят нормальный (Гаусса) закон распределения вероятностей результатов измерений фотоэлектрических параметров. Характеристики распределения оценивались на основании номинального значения и величины поля допуска: математическое ожидание принято равным номинальному значению, а среднее квадратическое отклонение – $1/6$ величины поля допуска.

Для оценивания показателей достоверности контроля многопереходных ФЭМ в результате контроля по трем фотоэлектрическим параметрам была предложена аналитическая модель, основанная на вычислении условных вероятностей:

$$P_I = P_{2-6}^I \cdot P_{2-2}^V \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{2-6}^V \cdot P_{2-2}^I \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{2-6}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^I \cdot P_{2-2}^V + P_{2-6}^I \cdot P_{2-6}^V \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{2-6}^I \cdot P_{2-6}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^V + P_{2-6}^V \cdot P_{2-6}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^I + P_{2-6}^I \cdot P_{2-6}^V \cdot P_{2-6}^{P_{\max}}, \quad (6)$$

$$P_{II} = P_{6-2}^I \cdot P_{2-2}^V \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{6-2}^V \cdot P_{2-2}^I \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{6-2}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^I \cdot P_{2-2}^V + P_{6-2}^I \cdot P_{6-2}^V \cdot P_{2-2}^{P_{\max}} + P_{6-2}^I \cdot P_{6-2}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^V + P_{6-2}^V \cdot P_{6-2}^{P_{\max}} \cdot P_{2-2}^I + P_{6-2}^I \cdot P_{6-2}^V \cdot P_{6-2}^{P_{\max}}, \quad (7)$$

где P_I - суммарная вероятность ошибок 1-го рода; P_{2-6}^I , P_{2-6}^V , $P_{2-6}^{P_{\max}}$ - вероятности признания фотоэлектрического модуля не удовлетворяющим установленным требованиям по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет;

P_{II} - суммарная вероятность ошибок 2-го рода; P_{6-2}^I , P_{6-2}^V , $P_{6-2}^{P_{\max}}$ - вероятности признания фотоэлектрического модуля удовлетворяющим установленным требованиям по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет;

P_{2-2}^I , P_{2-2}^V , $P_{2-2}^{P_{\max}}$ - вероятности признания фотоэлектрического модуля удовлетворяющим установленным требованиям по значению определенного

фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет ($P_{\Gamma-\Gamma} = \int_{\Delta_H}^{\Delta_B} \varphi(\Delta_T) d\Delta_T$).

Учитывая, что условные вероятности $P_{\sigma-\delta}$ и $P_{\delta-\sigma}$ примерно на два порядка меньше, чем $P_{\sigma-\sigma}$, то четвертым и последующими слагаемыми в выражениях (6), (7) можно пренебречь:

$$P_I \approx P_{\sigma-\delta}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^V \cdot P_{\sigma-\sigma}^{P_{\max}} + P_{\sigma-\delta}^V \cdot P_{\sigma-\sigma}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^{P_{\max}} + P_{\sigma-\delta}^{P_{\max}} \cdot P_{\sigma-\sigma}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^V, \quad (8)$$

$$P_{II} \approx P_{\delta-\sigma}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^V \cdot P_{\sigma-\sigma}^{P_{\max}} + P_{\delta-\sigma}^V \cdot P_{\sigma-\sigma}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^{P_{\max}} + P_{\delta-\sigma}^{P_{\max}} \cdot P_{\sigma-\sigma}^I \cdot P_{\sigma-\sigma}^V. \quad (9)$$

В результате вычислений с использованием программного кода MATLAB были получены следующие значения показателей достоверности измерительного контроля: $P_I=0,0159$; $P_{II}=0,0023$.

Оценки показателей достоверности контроля многопереходных ФЭМ, полученные аналитическим моделированием, были сопоставлены с результатами имитационного моделирования. Входными параметрами разработанной имитационной модели являются: количество контролируемых параметров; характеристики законов распределения вероятностей контролируемых параметров (для нормального (Гаусса) распределения: μ , σ); номинальные значения и допуски для контролируемых параметров. В имитационной модели предусмотрено изменение характеристик законов распределения вероятностей для неопределенностей измерений, коэффициента сужения контрольных допусков. При многократной реализации алгоритма принятия решений по результатам контроля в среде программирования MATLAB были получены средние значения вероятностей ошибок контроля: $P_I = 0,0148$; $P_{II} = 0,0022$. Сопоставимость результатов со значениями, полученными методом аналитического моделирования, свидетельствуют о корректности разработанной имитационной модели.

В четвертой главе определен метод калибровки имитатора солнечного излучения по энергетической освещенности (ЭО). Проведено экспериментальное исследование показателей качества системы контроля многопереходных ФЭМ и установлены оптимальные значения характеристик системы контроля

многoperеходных ФЭМ, обеспечивающие заданную достоверность результатов контроля.

При измерении ВАХ многoperеходных a -Si/ μ c-Si ФЭМ необходимо настраивать как ЭО, так и СПЭО в рабочей области ИСИ. Это связано с тем, что субэлемент a -Si имеет максимальную фоточувствительность в «синем» диапазоне спектра (400 – 700 нм), а субэлемент μ c-Si – в «красном» диапазоне спектра (600 – 950 нм). При настройке СПЭО предложено использовать метод, сущность которого заключается в определении соотношения интенсивностей излучения галогеновых и ксеноновых ламп, при котором регистрируемые значения фотоэлектрических параметров эталонного a -Si/ μ c-Si ФЭМ оказываются в пределах доверительных интервалов, установленных для этих параметров в сертификате калибровки (при $k = 2$, $P = 95 \%$): $U(I_{к.з.}) = \pm 2,5 \%$, $U(U_{x.x}) = \pm 1,0 \%$, $U(P_{max}) = \pm 3,0 \%$, $U(FF) = \pm 4,0 \%$. По результатам многократных измерений ВАХ многoperеходного ФЭМ было установлено, что указанному критерию соответствует световой поток с долей излучения от галогенового источника, $\Phi_T = (70,5 - 71,5) \%$.

В процессе настройки СПЭО, при изменении интенсивности излучения ксеноновых и галогеновых ламп, проводилась проверка стабильности величины ЭО в интервале $(1000 \pm 5) \text{ Вт/м}^2$ по току короткого замыкания эталонного a -Si ФЭМ.

Настройка и калибровка ИСИ по ЭО осуществлялась путем прямых измерений тока короткого замыкания эталонного полноразмерного a -Si ФЭМ. В результате было установлено соотношение между средним арифметическим значением 10 многократных измерений тока короткого замыкания эталонного ФЭМ ($I_{к.з.}^{кал}$) и его действительным значением ($I_{к.з.}^{эт}$), приведенном в сертификате калибровки.

Калибровка эталонного полноразмерного ФЭМ проводилась на ИСИ класса ААА [МЭК 60904-9 - 2009]. Схема реализации метода калибровки фотоприемников с использованием ИСИ класса ААА представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема реализации метода калибровки фотоприемников с использованием ИСИ класса ААА

В соответствии с ГОСТ 8.195 - 2013 была составлена иерархическая схема передачи единиц спектральной плотности энергетической освещенности и спектральной чувствительности при калибровке эталонного полноразмерного ФЭМ по величине тока короткого замыкания (т.к. величина тока короткого замыкания определяется на основании зависимости спектральной чувствительности $SR(\lambda)$ при определенной спектральной плотности энергетической освещенности $E(\lambda)$: $I_{к.з.} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda$). Действительное значение тока короткого замыкания и расширенная неопределенность эталонного полноразмерного α -Si ФЭМ при спектре излучения AM1,5G [ГОСТ Р МЭК 60904-3 - 2013] составляют $I_{к.з.}^{ЭТ} = (1,313 \pm 0,033)$ А.

В работе сформирована модель результата измерения тока короткого замыкания эталонного ФЭМ при калибровке имитатора по ЭО в промышленных условиях:

$$I_{к.з.}^{кал} = I_{к.з.}^{ЭТ} + \delta I_{приб} + \alpha \cdot \delta T + s \cdot \delta I_{NU} + \delta I_D + \delta I_{к.з.}^{ЭТ}, \quad (10)$$

где δI_D – изменение значения тока короткого замыкания ввиду нестабильности параметров эталонного ФЭМ; $\delta I_{к.з.}^{ЭТ}$ – сходимость результатов измерений тока короткого замыкания эталонного ФЭМ.

Сформирован бюджет неопределенности результата калибровки ИСИ по энергетической освещенности; значение суммарной стандартной неопределенности результата калибровки ИСИ составило $u(I_{к.з.}^{кал}) = \pm 1,26 \%$.

Данная величина является уточненной оценкой вклада методики калибровки ИСИ и эталонного устройства в суммарную неопределенность результата измерения тока короткого замыкания контролируемого ФЭМ, а также используется при расчете суммарных неопределенностей напряжения холостого хода и максимальной мощности.

Для экспериментального оценивания вкладов различных источников в суммарные неопределенности результатов измерений фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ был проведен анализ сходимости и воспроизводимости процесса измерения (MSA). Выполнены измерения фотоэлектрических параметров (максимальной мощности, тока короткого замыкания, напряжения холостого хода) трех ФЭМ в соответствии с планом: пять серий измерений, состоящих из шести наблюдений в условиях повторяемости. Каждой серии измерений предшествовала процедура инициализации ламп ИСИ. Обработка экспериментальных данных выполнялась методом дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием программного кода STATISTICA (модуль «Gage Repeatability & Reproducibility»). В результате сопоставления показателей сходимости и воспроизводимости со значениями критериев пригодности процесса измерений было установлено, что данный измерительный процесс пригоден для количественной оценки фотоэлектрических параметров многопереходных ФЭМ: изменчивость, связанная со сходимостью и воспроизводимостью, составляет менее 1 % от полной изменчивости для всех рассматриваемых фотоэлектрических параметров, в то время как изменчивость измеряемого параметра - около 99 %.

При анализе сходимости и воспроизводимости процесса измерения ВАХ многопереходных ФЭМ были получены экспериментальные оценки стандартных неопределенностей измерений фотоэлектрических параметров (неопределенности по типу *A* в соответствии с ГОСТ Р 54500.3 - 2011): для тока короткого замыкания – $\pm 0,105 \%$; для напряжения холостого хода – $\pm 0,159 \%$; для

максимальной мощности – $\pm 0,322$ %. Данные значения неопределенностей характеризуют влияние нестабильности ЭО и температуры во время измерения, а также неравномерности распределения ЭО и температуры по поверхности ФЭМ на точность измерений ВАХ.

Построены гистограммы распределения вероятностей результатов многократных измерений тока короткого замыкания и напряжения холостого хода многопереходного ФЭМ, на основании которых было выдвинуто предположение о нормальности распределения неопределенностей (погрешностей) фотоэлектрических параметров. Результаты вычислений D-статистики Колмогорова-Смирнова и вероятности Лиллиефорса с применением программного кода STATISTICA подтвердили справедливость гипотезы о нормальности распределения. Сформированы бюджеты неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров на основании расчетно-экспериментальных данных, оценены значения суммарных стандартных неопределенностей результатов измерений фотоэлектрических параметров: для тока короткого замыкания – $\pm 1,27$ %; для напряжения холостого хода – $\pm 0,35$ %; для максимальной мощности – $\pm 1,4$ %.

Для экспериментальной оценки показателей достоверности системы контроля были выполнены измерения 147 многопереходных ФЭМ из опытной партии. На основании статистического анализа полученных данных была подтверждена гипотеза экспоненциального распределения интервалов времени поступления ФЭМ на контроль. Построены гистограммы распределения вероятностей результатов измерений фотоэлектрических параметров опытной партии ФЭМ, вычислены статистические характеристики распределений. Методом имитационного моделирования рассчитаны показатели достоверности результатов контроля опытной партии ФЭМ при значении неопределенности, оцененной расчетно-экспериментальным методом: $P_I = 0,060$; $P_{II} = 0,017$.

Так как расчетно-экспериментальным методом были получены действительные значения неопределенностей при использовании выбранного метода калибровки ИСИ, то для достижения заданного уровня достоверности

контроля ($P_{II}=0,01$) было предложено сузить контрольные границы за счет уменьшения значения коэффициента сужения контрольных допусков до 0,96 ($K_i=0,96$). На рисунке 2 представлены зависимости вероятностей ошибок контроля от коэффициента сужения контрольных допусков. При данном значении коэффициента были установлены границы контрольных допусков для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ: для тока короткого замыкания – $(2,65 \pm 0,10)$ А; для напряжения холостого хода – $(73,0 \pm 5,8)$ В; для максимальной мощности – (130 ± 14) Вт.

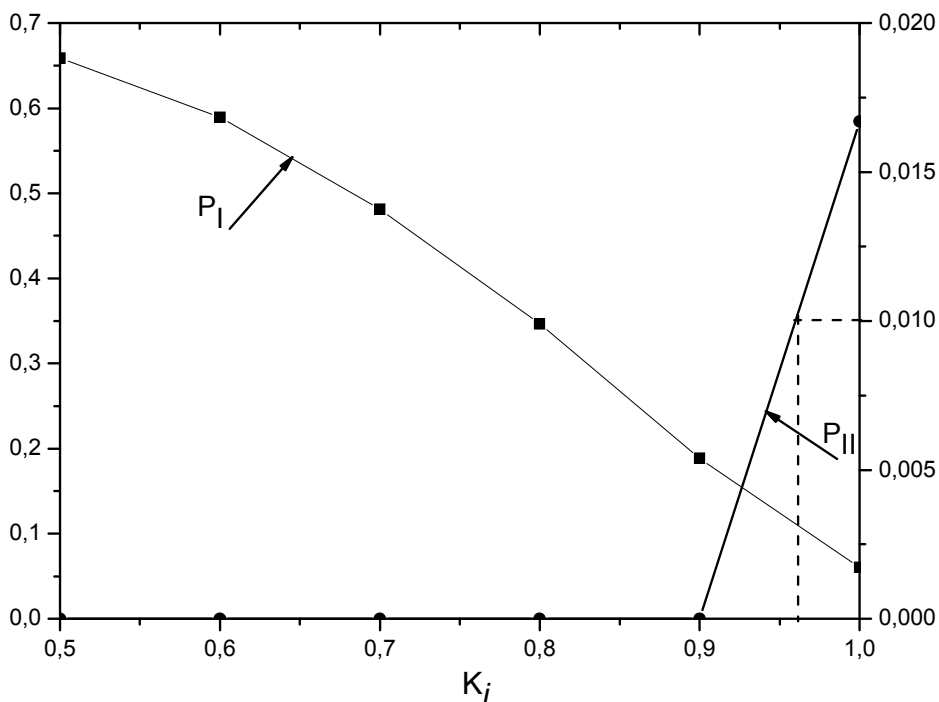


Рисунок 2 - Зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода при контроле фотоэлектрических параметров от коэффициента сужения контрольных допусков

В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

1) Сформирована структура системы выходного контроля многопереходных ФЭМ по фотоэлектрическим параметрам в соответствии с особенностями объекта и задачами контроля. Проанализированы основные

характеристики качества системы контроля: производительность, надежность, точность, достоверность - и установлены требования к данным показателям;

2) Определены значения показателей надежности оборудования системы контроля (среднее время наработки между отказами, среднее время восстановления), определяемые особенностями эксплуатации ИСИ. Значения показателей надежности ИСИ были использованы при исследовании их производительности.

3) Проанализирована производительность оборудования системы контроля при моделировании ее работы с использованием методик и подходов теории массового обслуживания. В результате имитационного моделирования процесса контроля ФЭМ были определены значения показателей производительности «максимальное количество ФЭМ в очереди» (Q_{maxC}), «коэффициент занятости ИСИ» (K_{zi}) при реализуемой технологии производства: $Q_{maxC} = 2$; $K_{zi} = 0,18$. Установлено, что увеличение объема производства в два раза (50 ФЭМ/час) не приводит к статистически значимому изменению указанных показателей производительности, значения которых сохраняются в допустимых пределах ($Q_{maxC} \leq 10$; $K_{zi} \leq 0,8$).

4) Составлены модели измерений фотоэлектрических параметров (тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности) многопереходных ФЭМ на производственной линии, систематизирована информация об источниках неопределенностей путем построения причинно-следственных диаграмм Исикавы, сформированы бюджеты неопределенностей на основании справочной информации о технических характеристиках ИСИ, свойствах исследуемого и эталонного ФЭМ, методе измерения ВАХ и др. Получены оценки расширенных неопределенностей фотоэлектрических параметров (при $P = 95\%$, $k = 2$): для тока короткого замыкания - $\pm 3,54\%$, для напряжения холостого хода - $\pm 0,74\%$, для максимальной мощности - $\pm 3,70\%$. Данные значения предназначены для предварительного исследования достоверности контроля.

5) Предложена аналитическая модель оценивания показателей достоверности многопараметрического контроля, описывающая зависимости ошибок контроля от характеристик распределения вероятностей результатов измерений фотоэлектрических параметров, неопределенностей измерений и положения допусковых границ. Получены оценки показателей достоверности на основании теоретических (расчетных) данных: $P_I = 0,0159$; $P_{II} = 0,0023$, что соответствует требованиям потребителей ($P_{II} \leq 0,01$). Построены зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от величины стандартной неопределенности для фотоэлектрических параметров, при анализе которых было установлено, что вероятности ошибок при контроле принимают наименьшее значение для напряжения холостого хода и наибольшее - для тока короткого замыкания.

6) Разработана имитационная модель процесса контроля, обеспечивающая расчет показателей достоверности (вероятности ошибок 1-го и 2-го рода) на основании следующих исходных данных: количество контролируемых параметров, характеристики законов распределения вероятностей контролируемых параметров, номинальные значения и допуски для контролируемых параметров. В результате многократного моделирования (30 повторений) были получены оценки показателей достоверности: $P_I = 0,0148$; $P_{II} = 0,0022$, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов, полученных при аналитическом и имитационном моделировании.

7) Предложена методика калибровки импульсного ИСИ по ЭО и СПЭО, учитывающая особенности структуры и конструкции контролируемых ФЭМ. Сформирован бюджет неопределенности результата калибровки ИСИ по ЭО на основании теоретических (справочных) и экспериментальных данных. Расширенная неопределенность результата калибровки ИСИ по ЭО составляет $\pm 2,52\%$ (при $P = 95\%$, $k = 2$).

8) Получены экспериментальные оценки стандартных неопределенностей измерений фотоэлектрических параметров, характеризующие влияние нестабильности ЭО и температуры во время измерения, а также неравномерность

распределения ЭО и температуры по поверхности ФЭМ: для тока короткого замыкания - $\pm 0,105$ %; для напряжения холостого хода - $\pm 0,159$ %; для максимальной мощности - $\pm 0,322$ %. Построены гистограммы, подтверждающие гипотезу о нормальном (Гаусса) распределении оценок неопределенностей.

9) Получены оценки расширенных неопределенностей измерений фотоэлектрических параметров расчетно-экспериментальным методом: для тока короткого замыкания - $\pm 2,54$ %; для напряжения холостого хода - $\pm 0,70$ %; для максимальной мощности - $\pm 2,80$ %.

10) Получены экспериментальные оценки показателей достоверности (вероятности ошибок 1-го и 2-го рода) по результатам контроля опытной партии многопереходных ФЭМ ($P_I=0,052$; $P_{II}=0,023$).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е., Шварц М.З. Оценка расширенной неопределенности результата измерения тока короткого замыкания тонкопленочных фотоэлектрических модулей // Измерительная техника. 2013. №11. С. 7-12. Перевод: Bogomolova S.A., Lukashov Yu.E., Shvarts M.Z. Estimate of the expanded uncertainty in the result of measuring the short circuit current of thin-film photovoltaic modules // Meas. Tech. 2014. V. 56. No 11. P. 1209-1215.

2. Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е., Шварц М.З. Анализ достоверности измерительного контроля энергопроизводительности фотоэлектрических модулей // Измерительная техника. 2014. №12. С. 6-10. Перевод: Bogomolova S.A., Lukashov Yu.E., Shvarts M.Z. Analysis of the reliability of measurement monitoring of the power output of photovoltaic modules // Meas. Tech. 2015. V. 57. No 12. P. 1338-1344.

3. Богомолова С.А. Особенности методов калибровки имитатора солнечного излучения при контроле энергопроизводительности многопереходных

фотоэлектрических модулей // Альтернативная энергетика и экология. 2015. №19 (183). С. 82 - 87.

4. Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е., Шварц М.З. Методика настройки и калибровки имитатора солнечного излучения при измерении многопереходных тонкопленочных фотоэлектрических модулей // Измерительная техника. 2016. №1. С. 34 - 37.

Публикации в иных рецензируемых научных изданиях:

5. Богомолова С.А. Оценка деятельности испытательных лабораторий (центров) // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 83-84.

6. Богомолова С.А. Показатели эффективности испытательного оборудования при производстве тонкопленочных солнечных модулей // XX Туполевские чтения: сб. тр. Международной молодежной научной конференции. Казань: КНИТУ-КАИ, 2012. Т. 3. С. 189 - 193.

7. Богомолова С.А. Анализ источников погрешностей измерения фотоэлектрических параметров тонкопленочных солнечных модулей // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 62-63.

8. Богомолова С.А. Расчет результирующей погрешности измерения фотоэлектрических параметров тонкопленочных солнечных модулей // Будущее машиностроения России: электронный сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Зарегистрировано в ФГУП НТИЦ «Информрегистр» №0321202782.

9. Богомолова С.А. Оценка показателей точности результатов измерения фотоэлектрических параметров тонкопленочных солнечных модулей // Состояние и проблемы измерений: сб. тр. Всерос. научно-технической конф. М.: Изд-во НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 98-101.

10. Богомолова С.А. Определение промежуточных показателей прецизионности результатов измерений фотоэлектрических параметров

тонкопленочных солнечных модулей // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 61-62.

11. Богомолова С.А. Анализ сходимости и воспроизводимости процесса измерения фотоэлектрических параметров тонкопленочных солнечных модулей // XXI Туполевские чтения: сб. тр. Международной молодежной научной конференции. Казань: КНИТУ-КАИ, 2012. Т. 1. С.121 – 123.

12. Bogomolova S.A., Gudovskikh A.S., Shvarts M.Z. Evaluation of the uncertainty in measuring IV characteristics of the thin-film modules // Photovoltaic Solar Energy: Proc. 28th European Conf. Paris (France), 2013, P. 3527-3533.

13. Шварц М.З., Богомолова С.А. Оценка неопределенности при измерении вольтамперных характеристик фотоэлектрических модулей // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Технические науки. 2014. № 7. С.136-139.

14. Богомолова С.А. Анализ источников неопределенности измерений спектральной фоточувствительности многопереходных фотоэлектрических преобразователей // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-го поколения сб. тр. Всероссийской научно-практической конференции. Чебоксары, 2014. С.128 - 131.

15. Богомолова С.А. Оценка показателей достоверности измерительного контроля фотоэлектрических параметров тонкопленочных солнечных модулей // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 72-73.

16. Богомолова С.А. Разработка системы контроля тонкопленочных фотоэлектрических модулей // Состояние и проблемы измерений: сб. тр. Всерос. научно-технической конф. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 119-122.

17. Богомолова С.А. Калибровка имитатора солнечного излучения при контроле энергопроизводительности многопереходных фотоэлектрических модулей // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-го поколения: сб. тр. Всероссийской научно-практической конференции. Чебоксары, 2015. С.140 – 142.