

На правах рукописи

Евсевичев Денис Александрович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ
ИНДИКАТОРОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации
проектирования (промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор
Самохвалов Михаил Константинович.

Официальные оппоненты:

Соснин Петр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
УлГТУ, кафедра «Вычислительная техника»,
зав. кафедрой

Беляев Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
МГОУ, кафедра теоретической физики,
зав. кафедрой

Ведущая организация – **Ульяновское конструкторское бюро
приборостроения, г. Ульяновск**

Защита диссертации состоится «23» декабря 2013 г. В 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важным элементом организационно-технического взаимодействия между человеком и современными электронными средствами являются индикаторные устройства. Одними из наиболее перспективных являются индикаторы на основе тонкопленочной электролюминесцентной (ТПЭЛ) технологии, занимающие особое место среди активных индикаторных устройств.

Основными требованиями, предъявляемыми к ТПЭЛ индикаторам, являются высокие электрические и светотехнические характеристики и параметры, а также их стабильность во времени. Стабильность параметров определяется, прежде всего, технологией изготовления устройства и выявляется в процессе проведения исследований. Основные функциональные параметры являются прогнозируемой величиной и могут быть выявлены на этапах проектирования ТПЭЛ индикаторов. Многообразие предъявляемых требований, необходимость обеспечения высокой производительности труда разработчика и высокого качества разработки проектных решений возможно путем использования средств автоматизации при проектировании ТПЭЛ индикаторов.

Необходимость разработки специализированных подходов и методов проектирования ТПЭЛ индикаторов связана: 1) с конструктивными особенностями ТПЭЛ структур, включающих несколько слоев диэлектриков и люминофоров, состоящих из множества различных материалов; 2) с использованием в расчетах как электрических, так и светотехнических для описания проектируемого индикатора.

В диссертационной работе была выбрана **область исследования**, содержание которой определяет методология автоматизированного проектирования в дисплейной технике, включающая постановку и формализацию проектных процедур и процессов проектирования индикаторов, а также выбор методов и средств для применения в их автоматизированном проектировании.

Объектом исследования в диссертационной работе является автоматизация проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов.

Предметом исследования в работе являются методы и средства для синтеза и анализа проектных решений при автоматизированном проектировании тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов.

Цель.

Целью данной работы является разработка методов и средств, обеспечивающих оптимизацию конструкций и уменьшение трудоемкости работ в процессах синтеза и анализа проектных решений в автоматизированном проектировании тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие конструкции ТПЭЛ индикаторов и рассмотреть возможные направления для автоматизации их проектирования.

2. Создать систему аналитических соотношений, связывающих конструктивные параметры монохромных и полноцветных универсальных тонкопленочных структур и функциональные характеристики электролюминесцентных индикаторов, эффективную в их автоматизированном проектировании.

3. Создать методическое обеспечение для проектирования ТПЭЛ индикаторов с учетом требований автоматизации.

4. Разработать программное обеспечение для осуществления автоматизированного проектирования ТПЭЛ индикаторов.

Научная новизна. Проведенные научные исследования процессов автоматизации проектирования ТПЭЛ индикаторов в ходе выполнения диссертационной работы позволили выделить следующие новые научные результаты:

1. Аналитические соотношения, моделирующие конструктивные параметры ТПЭЛ индикаторов и их функциональные характеристики, в основу которых положено представление индикатора как многослойной структуры, развиты и открывают возможность автоматизированного проектирования многослойных монохромных и полноцветных конструкций ТПЭЛ индикаторов.

2. Интегрированная совокупность методов структурного синтеза, параметрического синтеза и анализа многослойных монохромных и полноцветных ТПЭЛ индикаторов, позволяющая находить оптимальные по яркости и пороговому напряжению конструкции индикаторов, за счет разработки нескольких конструкций и оптимизации их конструктивных параметров, и позволяющая составлять описания конструкций ТПЭЛ индикаторов в автоматизированном режиме.

3. Совокупность алгоритмов структурного и параметрического синтеза, анализа многослойных конструкций монохромных и полноцветных ТПЭЛ индикаторов, нацеленных на повышение быстродействия за счет использования быстродействующих методов поиска оптимального проектного решения ТПЭЛ индикатора (метод штрафных функций, градиентный метод наискорейшего спуска) и простоты метода оценки проектного решения ТПЭЛ индикатора.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теорий анализа и синтеза, математического анализа, теории графов, математического программирования, теории оптимизации, технологий реляционных баз данных, объектно-ориентированного подхода к разработке программных средств.

Практическая значимость работы. Основным практическим результатом проведенных исследований является программная реализация методов и алгоритмов структурного и параметрического синтеза и анализа в системе автоматизированного проектирования ТПЭЛ индикаторов IDECSOft,

обеспечивающей расчет требуемых значений параметров индикаторов и составление документации на проектируемое устройство. Перечисленные особенности представляют систему как эффективный инструмент для проектирования ТПЭЛ индикаторов, который может быть использован на предприятиях, специализирующихся на производстве ТПЭЛ индикаторов.

Основные положения, выносимые на защиту. Проведенная научно-исследовательская работа позволила вынести на защиту следующие основные положения:

1. Обоснование аддитивного формирования аналитических зависимостей функциональных характеристик от конструктивных параметров многослойных монохромных и полноцветных тонкопленочных структур при изменении числа слоев ТПЭЛ индикатора.

2. Метод селективного структурного синтеза, заключающийся в поиске допустимых проектных решений и отсева структурных элементов по параметрам длины волны, пороговой напряженности и диэлектрической проницаемости люминофоров, электрической прочности и диэлектрической проницаемости диэлектриков, описывающих как электрические, так и светотехнические характеристики ТПЭЛ индикатора.

3. Метод редукционного параметрического синтеза при проектировании ТПЭЛ индикатора, позволяющий определять оптимальные значения конструктивных параметров для выбранной ТПЭЛ структуры с учетом требований, предъявляемых к проектируемому индикатору за счет использования метода идеальной точки, где для нахождения экстремума каждой отдельной целевой функции используется метод штрафных функций, минимизация которых осуществляется градиентным методом наискорейшего спуска.

4. Алгоритм квалиметрического анализа многослойных конструкций монохромных и полноцветных ТПЭЛ индикаторов, заключающийся в расчете основных электрических и светотехнических характеристик при определенных на этапах синтеза конструктивных параметрах и сравнении их с заданными техническими условиями.

5. Программная реализация алгоритмов селективного структурного синтеза, интегрированного параметрического синтеза и квалиметрического анализа, позволяющая в автоматизированном режиме осуществлять проектирование оптимальных многослойных конструкций монохромных и полноцветных ТПЭЛ индикаторов и рассчитывать их основные функциональные характеристики.

Достоверность. Достоверность представленных научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается адекватностью используемых математических моделей, корректностью методов их получения (дискретизация пространства исследования и алгебраизация), реализацией в программном обеспечении семантического контроля, близостью расчетных данных с результатами экспериментальных исследований.

Личный вклад. В диссертации изложены результаты работ, которые были выполнены соискателем лично под научным руководством профессора Самохвалова М.К. Автор разработал и исследовал методики конструкторского проектирования ТПЭЛ индикаторов, проводил расчеты, осуществлял обработку, анализ и обобщение получаемых результатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 44-й, 45-й, 46-й научно-технических конференции «Вузовская наука в современных условиях» (Ульяновск, УлГТУ, 2010-2013 г.), III Международной научно-практической конференции «Молодежь и наука XXI века» (Ульяновск, УГСХА, 23-26 ноября 2010 г.), 13-й, 14-й, 15-й научной школе – семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, Институт радиотехники и электроники, 2010-2012 г.), Международной конференции аспирантов и молодых ученых «Роль иностранного языка в научной, профессиональной и межкультурной коммуникации» (Ульяновск, УлГТУ, 19 апреля 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ – 2011, ИВТ – 2013) (Ульяновск, УлГТУ, 24-25 мая 2011 г., 23-25 мая 2013 г.), 9-й Международной научно-технической конференции: Интерактивные системы: проблемы человеко-компьютерного взаимодействия (Ульяновск, УлГТУ, 25-29 сентября 2011 г.), Молодежной научно-технической конференции «Автоматизация процессов управления» (Ульяновск, ФНПЦ ОАО «НПО «МАРС», 13-14 декабря 2011 г.), 3-м молодежном инновационном форуме Приволжского федерального округа (Ульяновск, УлГТУ, 12-14 мая 2011 г.), XII Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва, ВВЦ, 12-14 мая 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

Результаты работы оформлены в виде программы «Программа автоматизации инженерных расчетов тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов», зарегистрированной Федеральной службой по интеллектуальной собственности (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012617588 от 22.08.2012).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка используемых источников. Она изложена на 135 листах, содержит 28 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список содержит 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, выделены

основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость исследований, описана структура диссертации.

В первом разделе обоснована актуальность исследования тонкопленочных электролюминесцентных (ТПЭЛ) индикаторов. Проведенный сравнительный обзор современных информационных дисплеев позволил сделать вывод о возможности применения ТПЭЛ индикаторов в специализированной технике, относящейся к военной, медицинской, морской, космической отраслям, где предъявляются жесткие требования к аппаратуре. Проведенный аналитический обзор индикаторных устройств на основе ТПЭЛ технологии позволил определить основные разновидности и конструктивные особенности такого типа индикаторов.

Также в данной главе проведен анализ рынка современных средств автоматизации проектирования и исследования дисплейной техники. Рассмотрение современных решений в данных областях позволило сделать вывод о том, что системы автоматизированного проектирования (САПР) конкретных областей имеют свою специфику, однако для многих областей, в том числе для проектирования ТПЭЛ индикаторов, ряд фундаментальных положений при разработке САПР носит общий характер. К ним относятся подходы к разработке моделей объектов проектирования, принципы построения различных видов обеспечения САПР, организация человеко-машинного взаимодействия и т.д. Изучение классификации современных САПР и рассмотрение существующих программных аналогов в области изучения индикаторных устройств позволил определить направление разработки САПР ТПЭЛ индикаторов.

Во втором разделе проведены теоретические исследования электрических и светотехнических характеристик ТПЭЛ индикаторов и их зависимостей от конструктивных параметров.

В проведенных исследованиях ТПЭЛ индикаторов была предложена и обоснована адекватность модели представления рассматриваемых структур как набор последовательно соединенных конденсаторов. Использование такого подхода позволяет при исследовании электрических свойств ТПЭЛ индикатора перейти от математических моделей микроуровня (распределенных моделей) к математическим моделям макроуровня (сосредоточенным моделям).

В результате были формализованы следующие электрические характеристики универсальных ТПЭЛ структур:

1) Пороговое напряжение в ТПЭЛ структуре.

$$U_n = E_{nl} \cdot \left(d_n + \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{d1} + \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\partial 2}} \cdot d_{\partial 2} + \dots + \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right),$$

где E_{nl} – пороговая напряженность в люминесцентном слое;

$\varepsilon_{\partial j}$ – относительная диэлектрическая проницаемость отдельного j -ого слоя диэлектрика;

$d_{\partial j}$ – толщина отдельного j -го слоя диэлектрика;

ε_n – относительная диэлектрическая проницаемость люминесцентного слоя;

d_n – толщина люминесцентного слоя.

2) Максимально допустимое напряжение в ТПЭЛ структуре.

$$U_{max} = E_{nl}d_n + E_{n\partial 1} \cdot d_{\partial 1} + E_{n\partial 2} \cdot d_{\partial 2} + \dots + E_{n\partial m} \cdot d_{\partial m},$$

где $E_{n\partial j}$ – электрическая прочность или пробивная напряженность электрического поля в отдельном j -м слое диэлектрика.

3) Ток проводимости в ТПЭЛ структуре.

$$I_A = \varepsilon_0 \cdot S \cdot U_A \cdot \omega \cdot \left(\frac{d_{\partial 1}}{\varepsilon_{\partial 1}} + \frac{d_{\partial 2}}{\varepsilon_{\partial 2}} + \dots + \frac{d_{\partial m}}{\varepsilon_{\partial m}} \right)^{-1},$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – циклическая частота управляющего напряжения;

f – частота изменения внешнего напряжения;

S – площадь пикселя ТПЭЛ индикатора;

U_A – амплитуда рабочего напряжения.

4) Средняя мощность рассеяния энергии в ТПЭЛ структуре.

$$P_{cp} = 4 \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot E_{nl} \cdot d_n \cdot \left(\frac{d_{\partial 1}}{\varepsilon_{\partial 1}} + \frac{d_{\partial 2}}{\varepsilon_{\partial 2}} + \dots + \frac{d_{\partial m}}{\varepsilon_{\partial m}} \right)^{-1} \cdot (U_A - U_n).$$

5) Коэффициент полезного действия люминесцентного слоя в ТПЭЛ структуре.

$$\eta_{КПД} = \frac{2 \cdot (U_A - U_n)}{\pi \cdot U_A}.$$

Светотехнические характеристики и параметры ТПЭЛ индикаторов являются особенно важными при проектировании такого типа устройств и их значениями во многом определяются качество, эффективность и конкурентоспособность конечного устройства. Сложность формирования и исследования (решения) математических моделей описания светотехнических характеристик и параметров ТПЭЛ индикатора связана с их распределенным характером. Решение данной проблемы возможно путем алгебраизации, то есть аппроксимации дифференциальных и интегральных уравнений алгебраическими.

Основными параметрами, выделяемыми при рассмотрении ТПЭЛ индикаторов, являются:

1) Коэффициент видности ТПЭЛ индикатора.

$$K(\lambda) = 683 \cdot v(\lambda),$$

где $v(\lambda)$ – функция видности глаза или ордината кривой спектральной чувствительности глаза для соответствующего излучения с длиной волны λ ;

683 – световой эквивалент мощности, экспериментально установленный коэффициент (поток излучения мощностью 1 Вт с длиной волны $\lambda = 555$ нм соответствует 683 лм светового потока).

2) Максимальная яркость излучения ТПЭЛ индикатора.

$$B_0 = \frac{h \cdot c \cdot \eta_{onm} \cdot d_n \cdot K(\lambda) \cdot N}{\lambda \cdot \tau_r},$$

где $\frac{h \cdot c}{\lambda}$ – энергия кванта излучения;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

λ – максимум спектра излучения люминофора;

η_{onm} – оптический выход, показывающий какая часть возникающего в люминесцентной пленке излучения выходит во внешнее пространство;

N – концентрация активаторов;

τ_r – постоянная времени для излучательных переходов, соответствующая основной (рабочей длине) волны.

3) Максимальная светоотдача ТПЭЛ индикатора.

$$\eta_0 = \frac{\pi \cdot \eta_{onm} \cdot \sigma \cdot N}{e \cdot E_{nl}},$$

где σ – сечение столкновения;

e – заряд электрона.

4) Средняя яркость излучения ТПЭЛ индикатора.

$$B_{cp} = \left(\frac{1}{B_0} + \frac{1}{\eta_0 \cdot P_{cp}} \right)^{-1}.$$

5) Средняя светоотдача ТПЭЛ индикатора.

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{B_{cp}}{B_0} \right).$$

Анализ разработанного математический аппарат, описывающий основные электрические и светотехнические характеристики и параметры ТПЭЛ индикатора позволил выделить их зависимость от его конструктивных особенностей, в том числе материалов и толщин слоев.

Совокупность полученных аналитических зависимостей основных функциональных характеристик и параметров от конструктивных параметров ТПЭЛ структуры позволяет дать полное описание ТПЭЛ индикатора, необходимое и достаточное для создания индикаторного устройства, как нового изделия.

В третьем разделе рассмотрены существующие методики проектирования индикаторных устройств, как универсальных, так и предназначенных для решения узкого круга задач.

На основе анализа математического аппарата расчета основных электрофизических и светотехнических характеристик ТПЭЛ индикатора и их взаимосвязи с типом и параметрами выбранной конструкции была предложена методика проектирования ТПЭЛ индикатора.

Процесс проектирования ТПЭЛ индикатора (рисунок 1) состоит из этапов разработки и анализа технического задания на проектируемый индикатор, структурного и параметрического синтеза, в результате выполнения которых определяются структура и конструктивные параметры индикатора, и анализа, при котором определяются основные функциональные характеристики индикатора, сравниваются с требованиями технического задания и в случае необходимости корректируется задача синтеза.

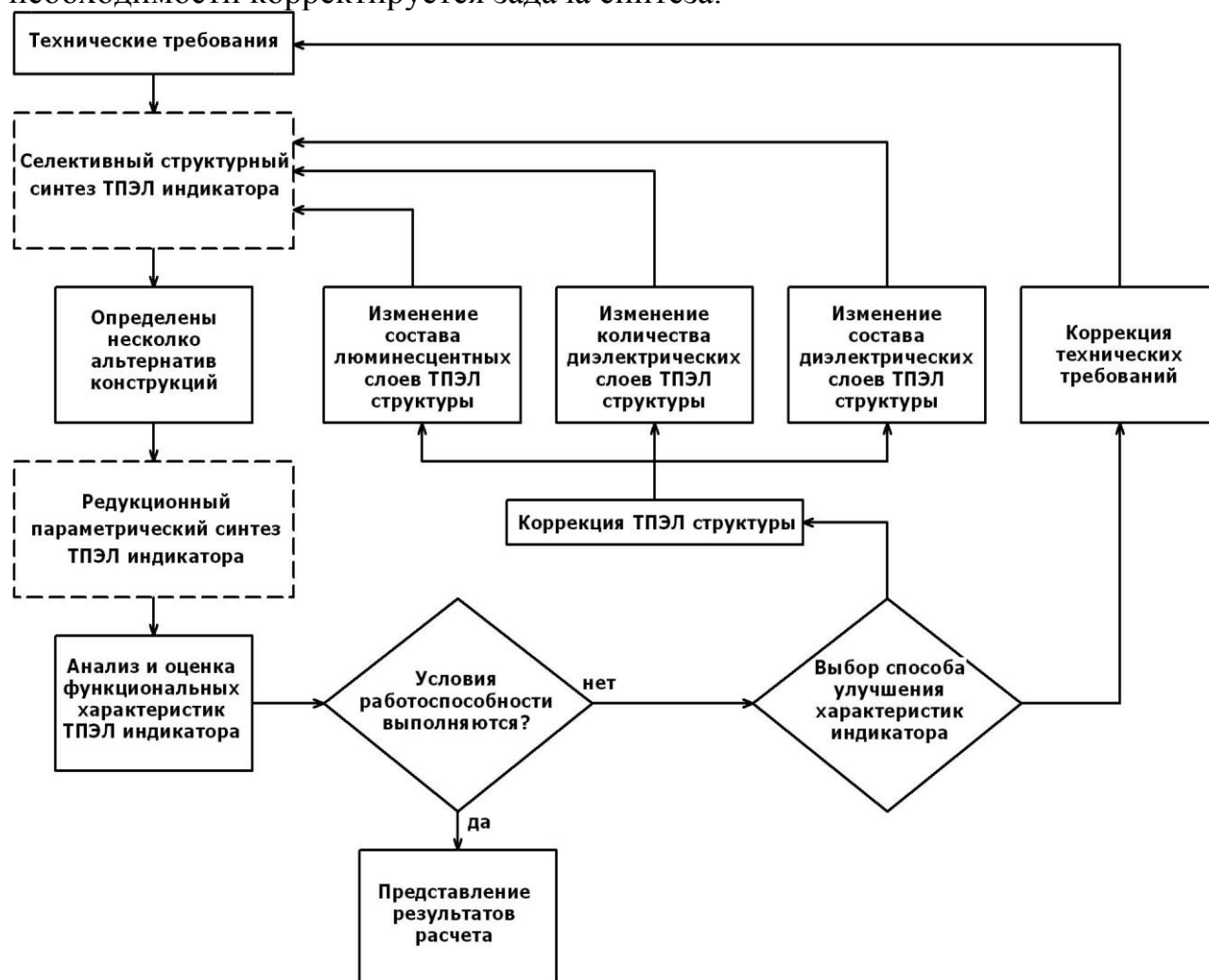


Рис. 1. Схема интеграции методов структурного и параметрического синтеза и анализа при проектировании тонкопленочного электролюминесцентного индикатора

Такой подход к проектированию позволил разработать и сформулировать методы решения задач структурного синтеза, параметрического синтеза и анализа ТПЭЛ индикатора.

1) Проектирование начинается с *селективного структурного синтеза*, при котором осуществляется выбор конструкции индикатора и материалов слоев. Задача синтеза структуры является сложно формализуемой задачей. Для

описания множества структурных решений были использованы морфологические И–ИЛИ деревья:

На рисунке 2 в прямоугольниках (в вершинах) отображены способы включения и элементы ТПЭЛ индикаторов. Связь типа «И», обозначаемая сплошной линией, характеризует компоненты, которые обязательно войдут в проектируемый индикатор, связь типа «ИЛИ» (пунктирная линия), характеризует компоненты, в которых только один из набора вариантов войдет в проектируемый индикатор.

В процессе выполнения структурного синтеза ТПЭЛ индикатора формируется множество альтернатив конструкций индикаторного элемента. Задача структурного синтеза конструкции индикатора состоит в поиске ветви графа, обеспечивающей выполнение набора правил с заданными в процессе составления технического задания ограничениями.

Итоговые конструкции ТПЭЛ индикаторов выбираются в параметрическом виде, т. е. без указания числовых значений параметров элементов.

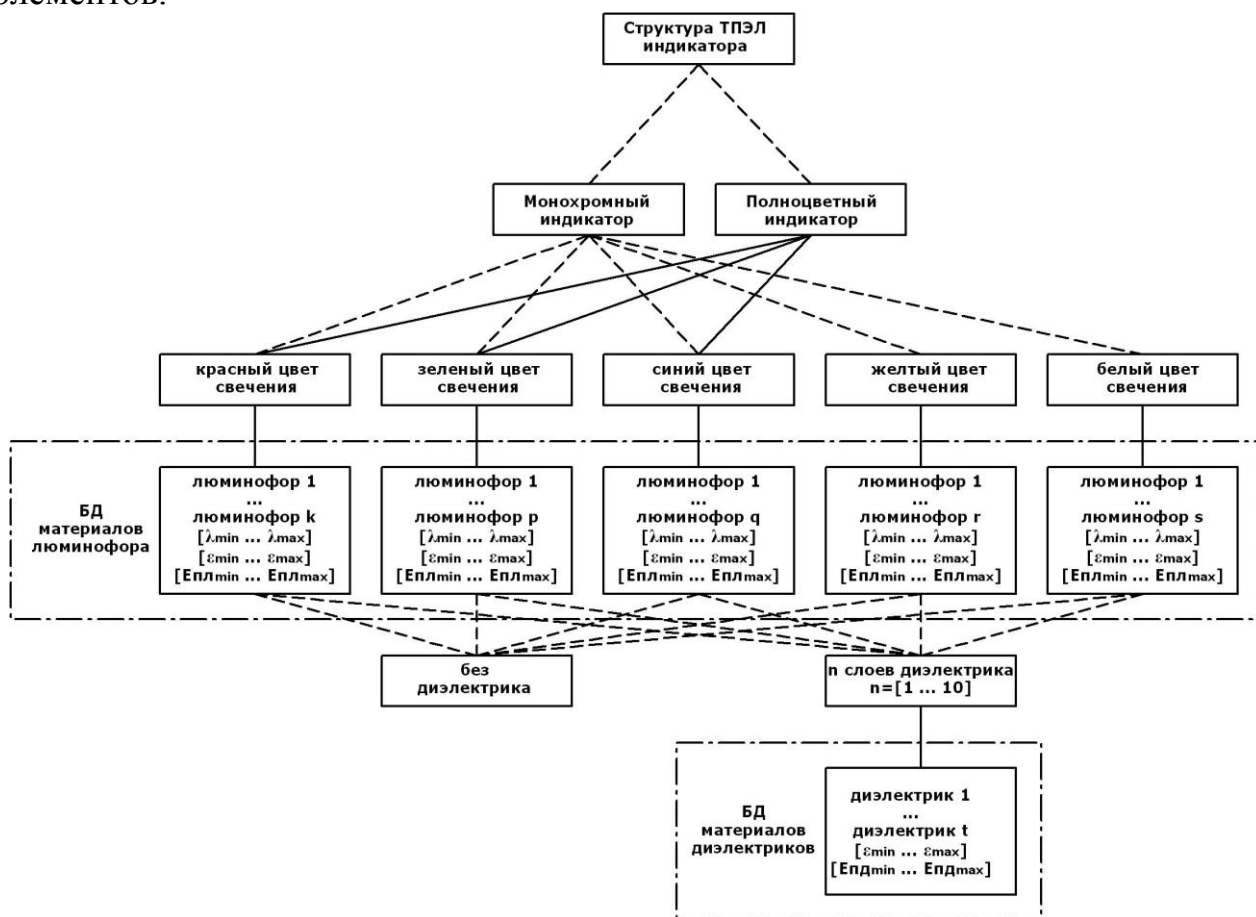


Рис. 2. Морфологическое И-ИЛИ дерево структуры ТПЭЛ индикатора

2) Следующим этапом проектирования является *редукционный параметрический синтез* индикатора, который заключается в определении наилучших значений конструктивных параметров для выбранной структуры объекта с учетом всех предъявляемых к проектируемому индикатору требований (рабочий диапазон электрических и светотехнических параметров).

Принятие лучшего решение означает выбор такой альтернативы из числа возможных, в которой с учетом всех разнообразных факторов будет оптимизирована общая эффективность структуры индикатора. Для ТПЭЛ индикаторов важнейшими характеристиками являются светотехнические и электрические. Такими функциями выступают зависимость максимальной яркости индикатора от толщины люминесцентного слоя и зависимость порогового напряжения от толщин люминесцентного и диэлектрических слоев. Эти функции характеризуют такие параметры, как средняя мощность, средняя яркость, продолжительность свечения источника излучения. Формально задачу параметрического синтеза ТПЭЛ индикатора можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} F_1(X) = U_n(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m}) \rightarrow \min \\ F_2(X) = B_0(d_l) \rightarrow \max \end{cases}$$

при ограничениях

$$\begin{cases} U_A < U_{\max}(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m}) \\ U_A \geq U_n(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m}) \\ d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m} > 0 \end{cases},$$

где $U_n(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m})$ – функция зависимости порогового напряжения от толщин слоев;

$B_0(d_l)$ – функция зависимости максимальной яркости от толщины люминесцентного слоя;

$U_{\max}(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m})$ – функция зависимости максимального напряжения от толщин слоев.

При проектировании монохромных ТПЭЛ индикаторов система принимает вид:

$$\begin{cases} E_{nl} \left(d_l + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \rightarrow \min \\ - \frac{h \cdot c \cdot \eta_{онм} \cdot K(\lambda) \cdot N}{\lambda \cdot \tau_r} \cdot d_l \rightarrow \min \end{cases}$$

при ограничениях

$$\begin{cases} E_{nl} \cdot d_l + E_{n\partial 1} \cdot d_{\partial 1} + \dots + E_{n\partial m} \cdot d_{\partial m} - U_A > 0 \\ U_A - E_{nl} \left(d_l + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \geq 0 \\ d_l > 0 \\ \forall d_{\partial i} > 0, \quad i = 1, \dots, m \end{cases},$$

При проектировании полноцветных ТПЭЛ индикаторов система усложняется в связи с рассмотрением каждого субпикселя в отдельности.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{nl1} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л1}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_{л1}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \rightarrow \min \\ E_{nl2} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л2}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 21} + \dots + \frac{\varepsilon_{л2}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \rightarrow \min \\ E_{nl3} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л3}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 31} + \dots + \frac{\varepsilon_{л3}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \rightarrow \min \\ - \frac{h \cdot c \cdot \eta_{onm1} \cdot K_1(\lambda) \cdot N_1}{\lambda_1 \cdot \tau_{r1}} \cdot d_l \rightarrow \min \\ - \frac{h \cdot c \cdot \eta_{onm2} \cdot K_2(\lambda) \cdot N_2}{\lambda_2 \cdot \tau_{r2}} \cdot d_l \rightarrow \min \\ - \frac{h \cdot c \cdot \eta_{onm3} \cdot K_3(\lambda) \cdot N_3}{\lambda_3 \cdot \tau_{r3}} \cdot d_l \rightarrow \min \end{array} \right.$$

при ограничениях

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{nl1} \cdot d_l + E_{n\partial 1} \cdot d_{\partial 11} + \dots + E_{n\partial m} \cdot d_{\partial m} - U_A > 0 \\ E_{nl2} \cdot d_l + E_{n\partial 1} \cdot d_{\partial 1} + \dots + E_{n\partial m} \cdot d_{\partial m} - U_A > 0 \\ E_{nl3} \cdot d_l + E_{n\partial 1} \cdot d_{\partial 1} + \dots + E_{n\partial m} \cdot d_{\partial m} - U_A > 0 \\ U_A - E_{nl1} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л1}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_{л1}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \geq 0 \\ U_A - E_{nl2} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л2}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_{л2}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \geq 0 \\ U_A - E_{nl3} \left(d_l + \frac{\varepsilon_{л3}}{\varepsilon_{\partial 1}} \cdot d_{\partial 1} + \dots + \frac{\varepsilon_{л3}}{\varepsilon_{\partial m}} \cdot d_{\partial m} \right) \geq 0 \\ d_l > 0 \\ \forall d_{\partial i} > 0, \quad i = 1, \dots, m \end{array} \right. .$$

Описанная многокритериальная задача решается методом идеальной точки с использованием штрафных функций. Найденные оптимальные значения конструктивных параметров (толщин люминесцентных и диэлектрических слоев), удовлетворяющих ограничениям, позволяют сформировать окончательную структуры ТПЭЛ индикатора.

3) Процедура *квалиметрического анализа* ТПЭЛ индикатора заключается в исследовании самого проектируемого индикатора и его описания, направленном на получение информации о его свойствах. Цель анализа – проверка работоспособности индикатора.

Проектная процедура анализа ТПЭЛ индикатора позволяет проводить исследование свойств синтезированного варианта индикатора с использованием разработанных математических моделей. На данном этапе происходит принятие проектного решения, то есть выбор варианта конструкции индикатора из сформированных на этапе синтеза альтернативных вариантов.

Решение задачи анализа ТПЭЛ индикатор включает расчет электрических характеристик и параметров (пороговое напряжение, максимальное рабочее напряжение, ток проводимости, средняя рассеиваемая мощность и др.) и светотехнических характеристик и параметров (максимальная и средняя яркость свечения, максимальная и средняя светоотдача и др.) при рассчитанных оптимальных конструктивных параметрах.

Процесс принятия проектного решения варианта конструкции ТПЭЛ индикатора носит итерационный характер (рис. 1). Коррекция спроектированной ТПЭЛ структуры выполняется при условии неудовлетворения синтезированного варианта проекта индикатора поставленным требованиям.

Решение представленных задач позволяет спроектировать оптимальную конструкцию ТПЭЛ индикатора и определить выполнимость требований ТЗ.

Четвертый раздел посвящен описанию разработанной на основе данных методик САПР ТПЭЛ индикаторов и видам ее обеспечения.

Методическое обеспечение включает совокупность методических материалов, обеспечивающих функционирование САПР ТПЭЛ индикаторов. Подробное описание методов проектирования (методы структурного и параметрического синтеза и анализа ТПЭЛ структуры) и методов решения задач оптимизации (метод идеальной точки, метод штрафных функций, градиентный метод) дано в третьем разделе.

Математическое обеспечение САПР ТПЭЛ индикаторов состоит из математических моделей, описывающих аспекты проектирования индикатора. На основе описанных ранее методов были сформированы алгоритмы структурного и параметрического синтеза и анализа, используемые при проектировании ТПЭЛ индикаторов.

Техническое обеспечение САПР ТПЭЛ индикаторов представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования электролюминесцентных излучательных устройств. Для решения поставленных в САПР ТПЭЛ индикаторов задач проектирования достаточным является использование персонального компьютера, содержащего процессор, оперативное запоминающее устройство, жесткий диск и периферийные устройства ввода-вывода информации (монитор,

принтер, клавиатура, манипулятор «мышь»). Выбранные технические средства гарантирует эффективность и скорость ее работы в операционной системе.

Основной частью *информационного обеспечения САПР ТПЭЛ* индикаторов являются банки данных, состоящие из баз данных (БД) материалов диэлектриков и люминофоров и систем управления базами данных (СУБД). Организация использования БД материалов представлена на рисунке 3.

СУБД с локальной архитектурой (программа и БД расположены на одном компьютере) в САПР ТПЭЛ индикаторов была разработана с использованием механизма Borland Database Engine (BDE), входящего в состав Delphi 7. Разработанная СУБД работает по стандарту Paradox, преимуществом которой является высокая скорость обработки данных. Данная система представляет собой инструмент для хранения, обработки и передачи информации посредством администрирования реляционных баз данных.

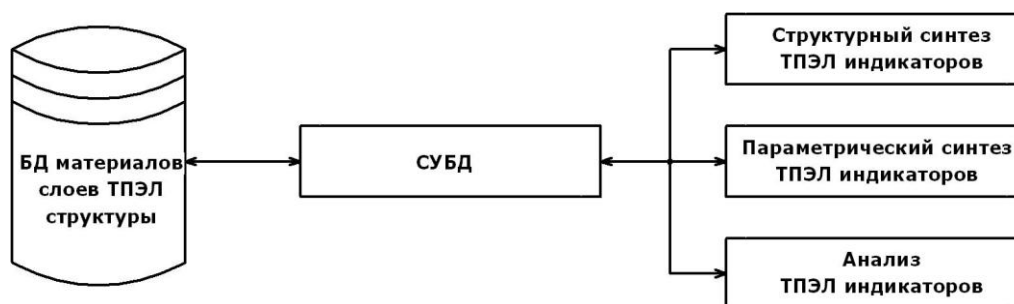


Рис. 3. Организация использования БД материалов на различных этапах проектирования ТПЭЛ индикаторов

Организация в описанном виде СУБД материалов слоев ТПЭЛ структуры позволяет производить быстрый расчет конструкций индикатора и обеспечивает удобство и оперативность пополнения БД диэлектрических и люминесцентных материалов слоев.

Лингвистическое обеспечение в САПР ТПЭЛ индикаторов представлено совокупностью языков, используемых в процессе разработки и эксплуатации программы. Основная задача данного вида обеспечения – реализация организационно-технического взаимодействия в системе.

Программное обеспечение САПР ТПЭЛ индикаторов объединяет программы для выполнения проектирования индикаторов с использованием ЭВМ.

В среде разработки Delphi 7 с использованием императивного, структурированного, объектно-ориентированного язык программирования Delphi разработана система IDECSOFT, позволяющая выполнять автоматизированное проектирование ТПЭЛ индикатора по описанным выше методикам синтеза и анализа. Разработанная автоматизированная система представляет собой прикладное программное обеспечение, запускаемое из операционной системы Windows. Программа работает непосредственно с пользователем, устанавливая необходимые связи для проведения расчета.

Запуск исполняемого файла из операционной системы открывает окно программы, представленной на рисунке 4.

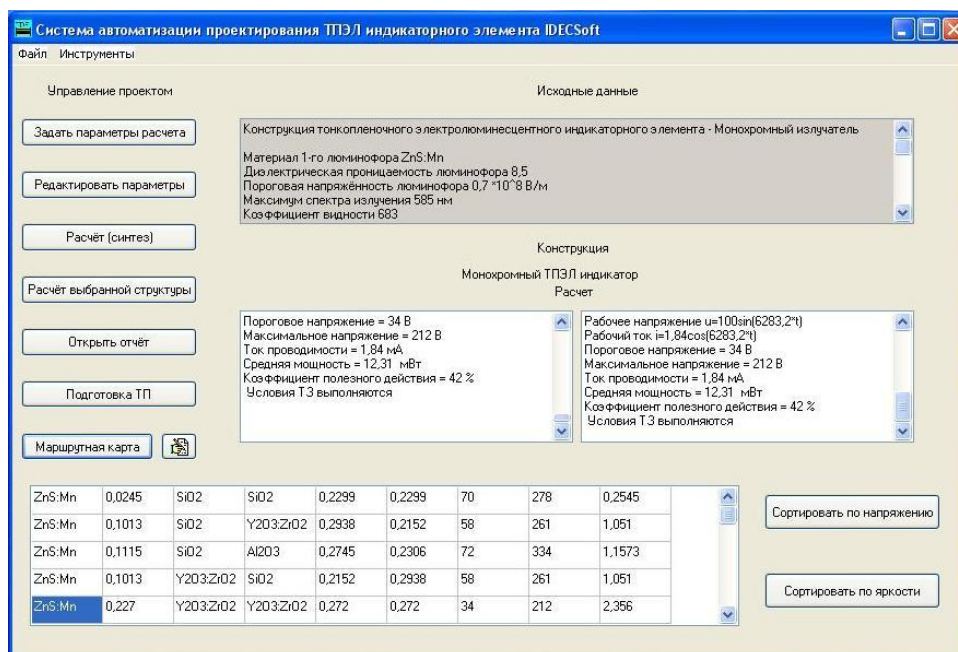


Рис. 4. Интерфейс программы IDECSOFT после выполнения проектирования монохромного TPЭЛ индикатора с двумя слоями из трех выбранных диэлектриков.

Окно программы разделено на четыре области:

- Область управления проектом, представляющая собой набор функциональных кнопок, задействованных на всех этапах проектирования TPЭЛ индикатора.

- Область «Исходные данные» отображает входные параметры, необходимые для выполнения параметрического синтеза TPЭЛ структуры, а также требования ТЗ, проверка выполнения которых осуществляется на этапе анализа TPЭЛ структуры.

- Область расчета содержит два текстовых мемо-компонента. В первом – отображаются общие параметры (полученные на этапе параметрического синтеза) спроектированных альтернативных структур, выбранных в результате структурного синтеза TPЭЛ индикатора. Во втором текстовом поле отображаются получаемые в результате анализа основные функциональные параметры, описанные во второй главе, по выбранному спроектированному устройству и уточняется верность выполнения требований ТЗ.

- В таблице представлено множество альтернатив сформированных в результате структурного синтеза TPЭЛ конструкций и основные параметры, получаемые на этапе параметрического синтеза – состав и толщина люминофора (1-й и 2-й столбец), состав и толщина слоев диэлектрика (3 – 6-й столбцы), пороговое напряжение TPЭЛ структуры (7-й столбец), максимальное напряжение TPЭЛ структуры (8-й столбец), максимальная яркость TPЭЛ структуры (9-й столбец).

Для программы IDECSOFT разработаны дополнительные компоненты, включающие инструменты исследования и разработки маршрутных карт

технологического процесса производства ТПЭЛ индикатора, которые позволяют составлять подробное описание проектируемого индикатора.

Достоинствами программы являются: простота использования, низкие требования к ресурсам, наличие пополняемой БД материалов слоев ТПЭЛ структуры и СУБД. При необходимости возможности программы могут быть расширены за счет разработки дополнительных компонентов.

С использованием программы проведена оценка точности расчетов функциональных характеристик от конструктивных параметров относительно экспериментальных данных (параметров образцов МДЛДМ структур ТПЭЛ индикаторов), полученных на кафедре «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета.

Таблица 1

| Состав | Исходные данные | | | | | Экспериментальные данные | | | Рассчитанные данные | | | Точность | |
|--------------------------------------|-----------------|-------|-------|-----|-------|--------------------------|------|---------|---------------------|--------|-------|----------|---------|
| | dл | dд1 | dд2 | Ua | f | Uп | Umax | B | Uп | Umax | B | ε | εmax |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 0,55 | 0,3 | 0,3 | 170 | 10000 | 120 | | | 124 | | | 0,03333 | 0,11399 |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 230 | 10000 | 198 | | | 218 | | | 0,1010 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 225 | 5000 | 193 | | | 215 | | | 0,1139 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 240 | 1000 | 203 | | | 220 | | | 0,08374 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 230 | 10000 | | 214 | | | 258,5 | | 0,20794 | 0,20794 |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 225 | 5000 | | 234 | | | 260,42 | | 0,11290 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 240 | 1000 | | 267 | | | 298,2 | | 0,11685 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 0,55 | 0,3 | 0,3 | 170 | 10000 | | | 10377,4 | | | 10245 | 0,01275 | 0,13085 |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 230 | 10000 | | | 11792 | | | 10249 | 0,13085 | |
| ZnS:Mn+SiO ₂ | 2,56 | 0,127 | 0,135 | 225 | 5000 | | | 9906 | | | 9129 | 0,07844 | |
| ZnS:Mn+Y ₂ O ₃ | 1,2 | 0,2 | 0,26 | 180 | 1000 | | | 3000 | | | 2860 | 0,04666 | |
| ZnS:Mn+Y ₂ O ₃ | 1,2 | 0,2 | 0,26 | 180 | 1000 | | | 1000 | | | 1125 | 0,125 | |

Проведенные исследования позволяют говорить о достаточно высокой точности выбранных математических моделей. Наиболее высокая относительная погрешность для аналитического выражения, описывающего максимальное допустимое напряжение, может быть объяснена неточностью технологического оборудования, используемого при производстве ТПЭЛ индикатора и невозможностью точного измерения напряжения при пробое ТПЭЛ структуры.

Для определения эффективности использования системы IDECSOft при проектировании ТПЭЛ индикаторов были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в таблице 2. Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о том, что при небольшом

увеличении числа элементов на этапе структурного синтеза значительно увеличивается число альтернатив ТПЭЛ конструкций, что ведет к увеличению времени затрачиваемого на синтез и оптимизацию ТПЭЛ структур

Таблица 2

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Число люминофоров | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Число слоев диэлектрика | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Число диэлектриков | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Число комбинаций ТПЭЛ структур | 1 | 4 | 9 | 1 | 8 | 27 | 2 | 8 | 18 | 2 | 16 | 54 |
| Расчет в IDECSoft, сек | 0,15 | 0,42 | 0,93 | 0,18 | 0,82 | 2,51 | 0,36 | 0,87 | 1,86 | 0,39 | 1,72 | 4,32 |

Для оценки эффективности разработанной программы были рассчитаны оптимальные конструктивные параметры ТПЭЛ структур в ручном режиме с использованием программы MS Excel. Для конструкций с 1 люминофором и 2 слоями диэлектриков одного типа время расчета составило 20 минут. Для той же конструкции, но с двумя различными типами диэлектриков время расчета составило 50 минут. Значительные затраты по времени на ручной расчет ТПЭЛ структур подтверждают эффективность использования средств автоматизированного проектирования ТПЭЛ индикаторов – программы IDECSoft.

Проанализировав представленные особенности САПР ТПЭЛ индикаторов IDECSoft, можно сделать вывод о том, что разработанный программный продукт является удобным инструментом для проектирования ТПЭЛ индикаторов и может быть использован в конструкторских бюро специализирующихся на производстве такого типа устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные научные исследования позволили разработать методики выполнения автоматизированного проектирования конструкций ТПЭЛ индикаторов и охарактеризовать программную реализацию таких подходов. В рамках выполнения представленной диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Составлены аналитические соотношения, связывающие конструктивные параметры ТПЭЛ индикаторов и их функциональные характеристики, в основу которых положено рассмотрение индикатора как многослойной структуры.

2. Разработана схема интеграции методов структурного и параметрического синтеза и анализа при проектировании тонкопленочного электролюминесцентного индикатора

3. Разработан метод селективного структурного синтеза, применяемый при проектировании универсальных конструкций монохромного и

полноцветного ТПЭЛ индикатора. Метод регламентирует последовательность действий, осуществляющую формирование альтернатив конструкций с различными составом и материалами слоев ТПЭЛ структур.

4. Разработан метод редуцированного параметрического синтеза универсальных конструкций монохромного и полноцветного ТПЭЛ индикатора, осуществляющий поиск оптимальных значений толщин слоев ТПЭЛ структур.

5. Метод квалитетического анализа ТПЭЛ индикатора адаптирован для решения задач автоматизированного проектирования. На данном этапе проектирования рассчитываются основные функциональные характеристики и параметры ТПЭЛ индикаторов и сравниваются с исходными данными.

6. Разработаны алгоритмы решения задач структурного и параметрического синтезов и анализа при проектировании конструкций ТПЭЛ индикатора.

7. Составлена база данных материалов слоев ТПЭЛ структуры и организована СУБД для ее пополнения и изменения.

8. На основе разработанных алгоритмов составлена программа IDECSOft, осуществляющая автоматизированное проектирование ТПЭЛ индикаторов.

9. Оценена точность расчетов функциональных характеристик с использованием программы IDECSOft, относительная погрешность составила не более 20%, что объясняется погрешностью производственного и измерительного оборудования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Евсевичев, Д.А. Автоматизация исследования материалов люминофоров и диэлектриков в тонкопленочных электролюминесцентных индикаторах / Д.А. Евсевичев, М.К. Самохвалов // Автоматизация в промышленности. – М.: ИнфоАвтоматизация, 2011 г. – № 9. – С.55-57.

2. Евсевичев, Д.А. САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова // Вестник Московского государственного областного университета, серия «Физика и математика», – М.: МГОУ, 2012 г. – №2. – С.131-135.

3. Евсевичев, Д.А. Автоматизированная система технологической подготовки производства тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств TFEL DDS / Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова, М.К. Самохвалов // Автоматизация в промышленности. – М.: ИнфоАвтоматизация, 2013 г. – № 9. – С.39-42.

В других изданиях

4. Евсевичев, Д.А. Автоматизированная система научных исследований процессов проектирования тонкопленочных средств отображения информации / Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова // Материалы III -й Международной научно-

практической конференции «Молодежь и наука XXI века», Ульяновск: УГСХА, 2010. – Т. IV. – С 31-34.

5. Евсевичев, Д.А. Разработка системы автоматизированного проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов 3-й Российской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2011/ под ред. Н.Н. Войта. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 206-210.

6. Самохвалов, М.К. Методика конструкторского проектирования в системе IDECSOft / М.К. Самохвалов, О.В. Максимова, Д.А. Евсевичев // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов 5-й Российской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2013/ под ред. Н.Н. Войта. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С. 109-115.

7. Евсевичев, Д.А. Разработка алгоритмов и программы расчета основных функциональных характеристик тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова // Автоматизация процессов управления: сборник докладов Молодежной научно-технической конференции. – Ульяновск, ФНПЦ ОАО «НПО«МАРС», 2011. – С. 34-40.

8. Самохвалов, М.К. Разработка математического аппарата расчета параметров и характеристик полноцветного тонкопленочного электролюминесцентного индикаторного элемента / М.К. Самохвалов, Д.А. Евсевичев // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск, УлГТУ, 2011. – С. 14-18.

9. Samokhvalov, M. Problem-solving methods of analysis and synthesis of the thin film electroluminescent element in indicator devices / M. Samokhvalov, O. Maksimova, D. Evsevichev, // Interactive Systems and Technologies: the Problem of Human-Computer Interaction. – Collection of scientific papers, 2011. – P. 375-379.

10. Evsevichev, D. The CAD System of the Thin Film Electroluminescent Display : collection of scientific papers / D. Evsevichev, O. Maksimova, M. Samohvalov // The 11th International Meeting on Information Display (IMID 2011). – KINTEX, Seoul, Korea, 2011. – P. 768-769.

Евсевичев Денис Александрович

Методы и средства структурно-параметрического синтеза тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов в автоматизированном проектировании

Автореферат

Подписано в печать 06.11.2013. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ 1043

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.