

ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 004.353.254.4

Д.А. Евсевичев, М.К. Самохвалов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР КОНСТРУКЦИЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИНДИКАТОРОВ ДЛЯ АВИОНИКИ

Евсевичев Денис Александрович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета, доцент кафедры управления воздушным движением и навигации Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева. Имеет статьи и монографии в области систем автоматизированного проектирования и оптоэлектроники. [e-mail: denistk_87@mail.ru].

Самохвалов Михаил Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, профессор кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи в области оптоэлектроники. [e-mail: sam@ulstu.ru].

Аннотация

Проведена разработка методов и средств проверки применимости тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств в качестве дисплеев для отображения навигационной и технической информации в воздушных судах. Электролюминесцентные дисплеи применяются в оборудовании и системах, от которых требуются высокие качество изображения и надежность, а также длительный срок службы устройств. Результатом выполненной работы является программа ЕхрАТ, позволяющая провести вычислительный эксперимент по проверке применимости тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств в авиационной технике. Алгоритм программы включает в себя выполнение итерационных вычислений параметров индикатора на интервалах, определяемых пользователем, сравнение их с заданными и запись полученных результатов. В результате проведения вычислительного эксперимента показаны варианты конструкций тонкопленочных излучающих структур, удовлетворяющие условиям эксплуатации индикаторов в авионике.

Ключевые слова: авиационная техника, электролюминесценция, индикатор, вычислительный эксперимент.

doi: 10.35752/1991-2927-2019-2-56-113-120

AUTOMATED SELECTION OF DESIGNS FOR THIN-FILM ELECTROLUMINESCENT DISPLAYS FOR AVIONICS

Denis Aleksandrovich Evsevichev, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Radioengineering Faculty of Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor of the Department of Air Traffic Control and Navigation of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute n. a. Marshal of the Air Force B.P. Bugaev; an author of articles in the field of computer-aided design and optoelectronics. e-mail: denistk_87@mail.ru.

Mikhail Konstantinovich Samokhvalov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor; graduated from the Faculty of Physics of Saratov State University; Professor at the Department of Design and Technology of Electronic Devices of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of optoelectronics. e-mail: sam@ulstu.ru.

Abstract

The development of methods and means for testing the applicability of thin-film electroluminescent indicator devices as displays for displaying navigation and technical information in aircraft is carried out. Thin-film electroluminescent displays are used in equipment and systems that require high image quality and reliability as well as a long service life of the devices. The result of the performed work is the ExpAT program, which allows to carry out a computational experiment to test of the applicability of the TFEL indicator devices in aeronautical engineering. The algorithm of the program includes iterative calculations of the indicator parameters at user-defined intervals, comparing them with the specified ones and recording the results. As a result of the computational experiment, variants of structures of thin-film emitting structures that meet the operating conditions of indicators in avionics are shown.

Key words: aircraft engineering, electroluminescence, indicator, simulation experiment.

ВВЕДЕНИЕ

Среди современных устройств отображения информации тонкопленочные электролюминесцентные (ТПЭЛ) индикаторы занимают свою особую нишу. Их с успехом используют в медицинском оборудовании, системах управления промышленными объектами, контрольно-измерительном оборудовании, на транспорте, в системах связи, авиационном оборудовании [1, 2]. По мнению многих специалистов, ТПЭЛ-дисплеи имеют ряд преимуществ перед различными современными устройствами отображения, созданными по другим технологиям. Основным производителем ТПЭЛ-устройств в мире является финская компания Veveq и в частности подразделение данной компании Lumineq, отвечающее за выпуск изделий по ТПЭЛ-технологии и промышленное производство продукции с применением технологии послойного атомного осаждения [3].

В Российской Федерации в настоящее время практически не проводятся исследования в области ТПЭЛ-индикаторной техники, несмотря на потенциальную коммерческую выгоду от реализации таких исследований. В частности, стоит отметить преимущества такого рода дисплеев перед прочими современными индикаторами в светотехнических (яркость, светоотдача) и эксплуатационных (вибростойкость, ударопрочность) характеристиках, что является актуальным для авиационной техники [4]. Недостатком же устройства является необходимость применения переменного высокого напряжения высокой частоты.

В связи с этим возникает вопрос применимости в качестве дисплеев в воздушных судах ТПЭЛ-индикаторных устройств, питание которых будет осуществляться от сети 200 В с частотой 400 Гц. Представленная работа посвящена анализу применимости на основе разработанного математического аппарата.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ИНДИКАТОРНЫМ УСТРОЙСТВАМ

Важным элементом кабины пилота являются средства отображения информации, обеспечивающие

функционирование режима «человек-машина». Общими требованиями по безопасности и эргономичности к средствам отображения информации, гармонизированными с международными стандартами ИСО 9241-3:1996, ИСО 9241-8:1997 и описанными в ГОСТ Р 50948-2001 «Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности», являются визуальные параметры дисплея (характеристики отображения и восприятия информации), эмиссионные параметры дисплея (характеристики электростатического, переменных электрического и магнитного полей, создаваемых дисплеем), а также обеспечение оптимального диапазона значений параметров дисплеев. Для точного считывания информации и обеспечения комфортных условий ее восприятия работа с дисплеями должна проводиться при таких сочетаниях значений яркости и контраста изображения, внешней освещенности экрана, углового размера знака и угла наблюдения экрана, которые входят в оптимальные или предельно допустимые (при кратковременной работе) диапазоны.

Согласно вышеописанным стандартам, можно выделить основные эргономические требования и требования к безопасности, предъявляемые к средствам отображения информации рабочего места пилота (кабины):

- 1) угол обзора должен составлять от 130° до 180°;
- 2) яркость дисплея определяется яркостью знака и должна быть не менее 35 кд/м² для дисплеев на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) и не менее 20 кд/м² – для плоских экранов;
- 3) неравномерность яркости рабочего поля экрана и элементов знака должна быть не более 20%;
- 4) яркостный контраст внутри знака и между знаками должен быть не менее 3:1;
- 5) напряженность электрической составляющей переменного электромагнитного поля дисплея должна быть не более 25 В/м в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц и не более 2,5 В/м – в диапазоне частот от 2 до 400 кГц;
- 6) плотность магнитного потока должна быть не более 250 нТл в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц и 25 нТл – в диапазоне частот от 2 до 400 кГц.

Большая часть представленных параметров обеспечивается различными технологиями изготовления дисплеев. Однако особый интерес представляют яркостные параметры и характеристики, так как они обеспечиваются не только конструкторско-технологическими особенностями изготовления того или иного дисплея, но и особенностями их эксплуатации.

Выбор оптимального с точки зрения технологичности, эргономики и безопасности средства отображения информации для рабочего места диспетчера подразумевает рассмотрение основных современных информационных дисплеев [1, 2]. К таким можно отнести ЭЛТ-дисплеи, жидкокристаллические дисплеи, дисплеи на основе органических светодиодов и ТПЭЛ-дисплеи. Сравнительный анализ приведенных дисплеев по эксплуатационным параметрам был проведен в [4]. Согласно нему можно сделать вывод, что, несмотря на сравнительную дешевизну ЭЛТ-дисплеев, применение их в современных кабинах пилотов является нежелательным, так как с точки зрения эксплуатации, эргономики и безопасности они обладают рядом недостатков, повышающих усталость оператора и тем самым снижающих безопасность полетов, таких как: неоднородность изображения, плохие показатели по фокусировке, наличие ошибок в совмещении цветов, наличие значительных показателей электромагнитных излучений (напряженность электрической составляющей переменного электромагнитного поля, плотность магнитного потока), низкие контрастность и угол обзора.

Сравнивая же плоские дисплеи, можно сделать вывод о том, что ТПЭЛ-дисплеи превосходят по светотехническим характеристикам жидкокристаллические, однако уступают дисплеям на базе органических светодиодов, что, впрочем, компенсируется их высокими конструкторско-технологическими параметрами (среднее время безотказной работы, диапазон рабочих температур, радиационная стойкость, вибро- и ударопрочность). Отсюда вытекает возможность применения ТПЭЛ-устройств не только в технике общего назначения, но и в военной, медицинской, космической отраслях, а также важной с точки зрения безопасности полетов

области – на рабочем месте пилота, где предъявляются специфичные, а порой и жесткие требования к аппаратуре. Кроме того, особенностью данных систем является уменьшение массогабаритных параметров за счет сокращения числа составляющих его компонентов.

Благодаря высокому качеству изображения ТПЭЛ-дисплеи находят широкое применение в средствах отображения информации и идеально подходят для применения в сложных условиях, когда приборы на основе других технологий не дают необходимых результатов [2]. Электролюминесцентные дисплеи чаще всего применяются в оборудовании и системах, от которых требуются высокие качество изображения и надежность, а также длительный срок службы устройств.

КОНСТРУКЦИЯ ТПЭЛ-ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

ТПЭЛ-индикаторы относятся к современным индикаторным устройствам и имеют высокий потенциал применения в качестве средств отображения информации, особенно в специализированной технике. Они представляют собой полностью твердотельную конструкцию и имеют высокие эксплуатационные показатели, такие как: яркость, надежность, широкий диапазон рабочих температур, быстродействие, большой угол обзора, радиационная стойкость.

Наиболее типичная конструкция электролюминесцентных конденсаторов содержит пять слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку [5]: проводящий нижний, диэлектрический нижний, люминесцентный, верхний диэлектрический, верхний проводящий (рис. 1).

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.

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 характеристик для описания проектируемого индикатора.

Типы и конструкции ТПЭЛ-индикаторов различаются составом и пространственным расположением слоев тонкопленочных структур, конфигурацией и взаимным расположением электродов, обусловленных требованиями к назначению и функциональным характеристикам индикаторных устройств.

Принцип построения ТПЭЛ-устройств заключается в последовательном нанесении пленок диэлектриков, люминофоров и проводящих материалов на поверхность

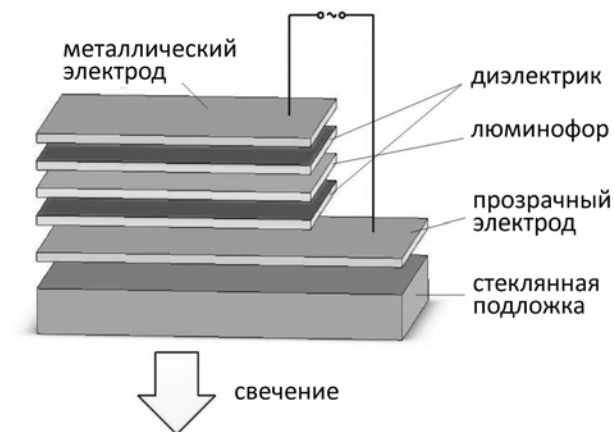


Рис. 1. Типичная конструкция ТПЭЛ-источника излучения

подложки. Типичная конструкция электролюминесцентных конденсаторов содержит пять слоев: проводящий нижний, диэлектрический нижний, люминесцентный, верхний диэлектрический, верхний проводящий. Кроме указанной конструкции, разрабатываются и другие типы источников излучения, имеющие разное число диэлектрических слоев. К достоинствам индикаторных устройств с меньшим числом слоев относятся, как правило, меньшие значения управляющего напряжения, а к недостаткам – более низкие яркость и светоотдача, меньшая надежность. Для улучшения электрических характеристик и снижения пористости структуры иногда используют многослойные диэлектрические пленки. Такая особенность производства ТПЭЛ-индикаторов обуславливает необходимость рассмотрения универсальной конструкции ТПЭЛ-индикаторного элемента при проектировании.

В эквивалентной схеме люминесцентный слой имитируется конденсатором с емкостью, равной геометрической емкости пленки люминофора, и параллельно включенным сопротивлением и включенными навстречу друг другу стабилитронами [6]. Нелинейные электрические свойства пленки люминофора связаны с тем, что в слабых полях люминофор является достаточно высокоомным, а в сильных полях его сопротивление резко уменьшается [7]. Слои диэлектрика в эквивалентной схеме представлены конденсаторами, емкости которых соответствуют геометрическим емкостям диэлектрических пленок. Значения номиналов элементов схемы рассчитываются, исходя из соответствующих величин для реальных тонкопленочных электролюминесцентных структур. Описание представленного ТПЭЛ-индикатора как набора последовательно соединенных конденсаторов позволяет при исследовании электрических свойств устройства перейти от математических моделей микроуровня (распределенных моделей) к математическим моделям макроуровня (сосредоточенным моделям) путем дискретизации пространства исследования.

Проведенные исследования отечественных научных и производственных сегментов в области проектирования индикаторных устройств позволили сделать вывод о том, что в настоящее время разработки ведутся как в направлении создания индикаторных панелей, так и в направлении схемотехнических решений управления параметрами индикаторных панелей. Перечисленные особенности проектирования особенно актуальны при создании индикаторов, применяемых в специализированной технике.

Проектирование оптимальных конструкций ТПЭЛ-индикаторных устройств, расчет основных конструкторско-технологических показателей разработанного устройства, а также проведение научных исследований структуры, состава слоев являются взаимосвязанными процессами, что обусловлено методиками расчета основных функциональных характеристик и параметров индикаторных устройств. Вспомогательной частью этих процессов является составление баз данных свойств и параметров материалов, komponующих структуру.

Синтез проектных решений конструкций ТПЭЛ-устройства подразумевает определение не только оптимальной структуры индикаторного элемента, но и наилучших параметров индикаторной аппаратуры, включающих расчет оптимального теплового режима функционирования индикатора, схемотехническое проектирование системы управления индикатора, выбор эффективной элементной базы для компоновки устройства, расчет надежности и вибропрочности.

Предложенная эквивалентная электрическая схема ТПЭЛ-индикаторного элемента [5, 6] позволяет разработать математический аппарат описания основных характеристик и параметров устройства, а также осуществить на его основе вычислительный эксперимент.

Согласно [8], вычислительный эксперимент должен включать следующие этапы: построение математической модели, описывающей исследуемый процесс или явление; выбор численных методов расчета; разработка вычислительного алгоритма; создание программы, реализующей вычислительный алгоритм; проведение расчетов и обработка полученной информации; анализ результатов расчетов.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИМЕНИМОСТИ ТПЭЛ-ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ В АВИОНИКЕ

Для решения вопроса о применимости ТПЭЛ-индикаторных устройств в авиационной технике следует определить границы условий работы таких устройств. Согласно [9], спроектированный ТПЭЛ-индикатор можно описать следующим образом:

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

при ограничениях

$$\begin{cases} U_A < U_{\max}(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m}), \\ U_A \geq U_n(d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial m}), \\ d_l, d_{\partial 1}, \dots, d_{\partial i} > 0, \end{cases} \quad (2)$$

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

$B_{cp}(d_l)$ – функция зависимости средней яркости от толщины люминесцентного слоя;

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

U_A – амплитуда рабочего напряжения;

d_l – толщина люминесцентного слоя проектируемого индикатора;

$d_{\partial i}$ – толщина i -го диэлектрического слоя проектируемого индикатора ($i = 1 \dots m$).

Для описания параметров ТПЭЛ-устройства воспользуемся формулами из [5]. Пороговое напряжение в ТПЭЛ-индикаторе определяется по формуле:

$$U_n = E_{nl} \cdot \left(d_l + \frac{\epsilon_l}{\epsilon_{\delta 1}} \cdot d_{d1} + \frac{\epsilon_l}{\epsilon_{\delta 2}} \cdot d_{\delta 2} + \dots \right. \quad (3)$$

$$\left. \dots + \frac{\epsilon_l}{\epsilon_{\delta m}} \cdot d_{\delta m} \right),$$

где E_{nl} – пороговая напряженность электрического поля в люминофоре;

ϵ_l – относительная диэлектрическая проницаемость люминесцентного слоя;

$\epsilon_{\delta j}$ – относительная диэлектрическая проницаемость отдельного j -го слоя диэлектрика.

Пороговое напряжение в ТПЭЛ-структуре с определенным люминофором линейно зависит от значений конструктивных параметров (толщин слоев) и обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям диэлектрических слоев. Пороговое напряжение может быть уменьшено при использовании диэлектриков с более высокими значениями диэлектрической проницаемости.

При превышении порога включения ТПЭЛ-индикатора падение напряжения и напряженность электрического поля в слое люминофора практически не изменяются и остаются равными пороговому значению [7]. В этом случае ограничение уровня напряжения определяется электрической прочностью каждого отдельного диэлектрика и структуры в целом. Максимально допустимое напряжение, прикладываемое к структуре, определяется выражением:

$$U_{\max} = E_{nl} d_l + E_{n\delta 1} \cdot d_{\delta 1} + E_{n\delta 2} \cdot d_{\delta 2} + \dots \quad (4)$$

$$\dots + E_{n\delta m} \cdot d_{\delta m},$$

где $E_{n\delta i}$ – пробивная напряженность электрического поля в i -м диэлектрике.

Соотношение для расчета средней яркости излучения ТПЭЛ-индикаторного элемента за период изменения управляющего напряжения может быть определено по формуле [7]:

$$1. \quad B_{cp} = \left(\frac{1}{B_0} + \frac{1}{\eta_0 \cdot P_{cp}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где B_0 – максимальная яркость излучения ТПЭЛ-индикатора;

η_0 – максимальная светоотдача;

P_{cp} – средняя рассеиваемая мощность в слое люминофора.

В данном выражении можно отметить, что средняя яркость излучения в ТПЭЛ-структуре зависит от максимальной яркости излучения и от средней рассеиваемой мощности, то есть от величины порогового напряжения.

Выражение для средней рассеиваемой мощности в слое люминофора имеет вид [7]:

$$P_{cp} = 4 \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot E_{nl} \cdot d_l \times \quad (6)$$

$$\times \left(\frac{d_{d1}}{\epsilon_{\delta 1}} + \frac{d_{\delta 2}}{\epsilon_{\delta 2}} + \dots + \frac{d_{\delta m}}{\epsilon_{\delta m}} \right)^{-1} \cdot (U_A - U_n),$$

где f – частота изменения внешнего напряжения;

S – площадь перекрытия обкладок конденсатора в ТПЭЛ-структуре;

ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Анализ полученного выражения позволяет сделать вывод о том, что средняя рассеиваемая мощность в слое люминофора при излучении (в рабочем режиме) зависит от конструктивных параметров ТПЭЛ-структуры (количества и состава материалов слоев, толщины слоев и площади перекрытия обкладок электролюминесцентного конденсатора) и характеризуется разностью между амплитудным и пороговым значениями напряжения ТПЭЛ-индикатора.

Для расчета максимальной яркости ТПЭЛ-индикаторного элемента используется выражение [7]:

$$B_0 = \frac{h \cdot c \cdot \eta_{omn} \cdot d_l \cdot K(\lambda) \cdot N}{\lambda \cdot \tau_r}, \quad (7)$$

где $(h \cdot c) / \lambda$ – энергия кванта излучения;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

λ – максимум спектра излучения люминофора;

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

$K(\lambda)$ – коэффициент видности;

N – концентрация активаторов;

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

Особенностью определения максимальной яркости ТПЭЛ-индикаторного элемента является ее линейная зависимость от толщины слоя люминофора.

Максимальная величина светоотдачи может быть записана:

$$\eta_0 = \frac{\pi \cdot \eta_{omn} \cdot \sigma \cdot N}{e \cdot E_{nl}}, \quad (8)$$

где σ – сечение ударного возбуждения;

e – заряд электрона.

Физический смысл этой величины соответствует значению светоотдачи при условиях, что в результате протекания активного тока в люминесцентном слое ТПЭЛ-структуры возбуждаются все активаторные центры свечения. Также для данного процесса протекания тока принимается допущение об отсутствии взаимосвязи между ускоренными электронами и возбужденными центрами свечения.

Для решения задачи о применимости ТПЭЛ-индикаторных устройств в авиационной технике можно ввести ряд упрощений:

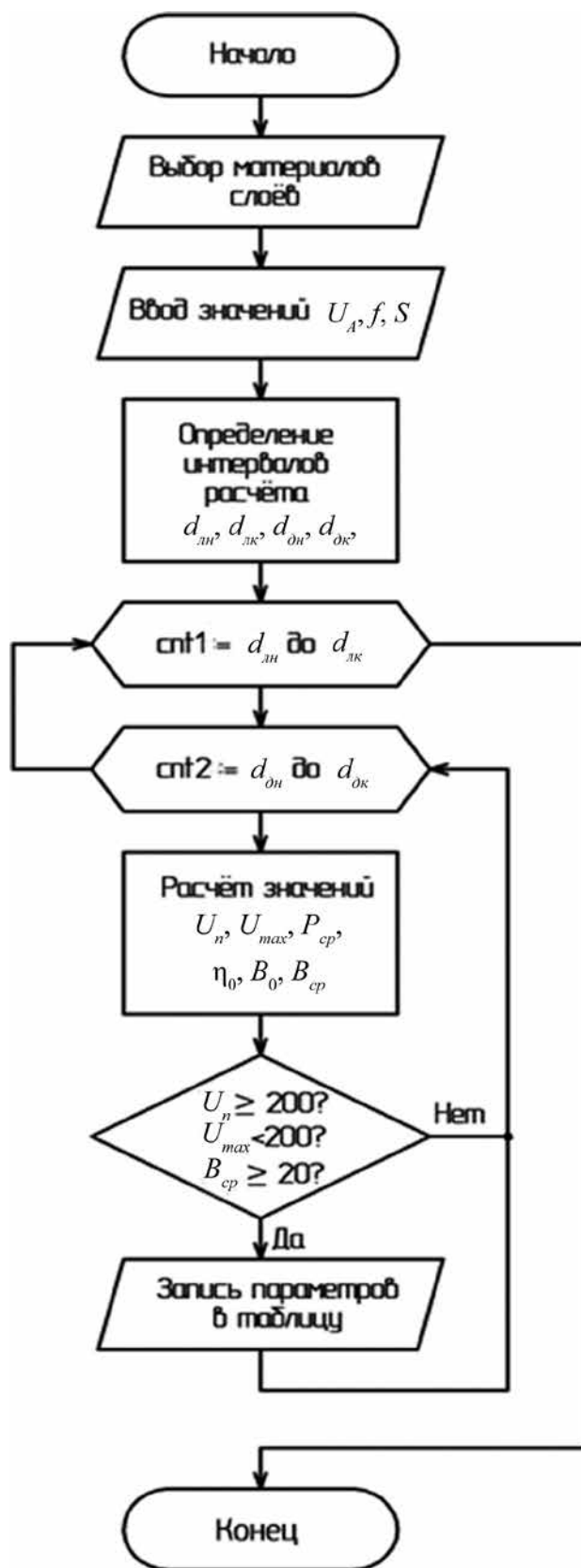


Рис. 2. Алгоритм выполнения вычислительного эксперимента для проверки гипотезы о применимости ТПЭЛ-индикаторов в авиационной технике

1) Рассмотрим простейшую конструкцию ТПЭЛ-индикатора, состоящего из одного люминесцентного слоя и двух одинаковых по составу и толщине диэлектрических слоев.

2) Осуществим поиск не наилучших, а всех возможных решений.

3) В качестве ограничения следует взять значения, соответствующие заданным условиям эксплуатации и ГОСТ Р 50948-2001: $U_A = 200$ В, $f = 400$ Гц, $B_{cp} \geq 20$ кд/м².

В этом случае задача (1) с ограничениями (2) может быть переписана следующим образом:

$$\begin{cases} 200 < U_{\max}(d_l, d_d), \\ 200 \geq U_n(d_l, d_d), \\ B_{cp}(d_l) \geq 20, \\ d_l, d_d > 0. \end{cases} \quad (9)$$

Нахождение одного или нескольких решений представленной системы позволит говорить о ее разрешимости. Тогда, согласно принципу индукции (переходя от частного к общему), можно будет утверждать о возможности применения ТПЭЛ-индикаторных устройств в авиационной технике.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПРОВЕРКЕ ГИПОТЕЗЫ О ПРИМЕНИМОСТИ ТПЭЛ-ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

Результатом проведённой исследовательской работы является разработанный алгоритм выполнения вычислительного эксперимента, представленный на рисунке 2. Алгоритм программы включает в себя выполнение итерационных вычислений параметров индикатора на интервалах, определяемых пользователем, сравнение их с заданными, согласно полученному выражению (9), и запись положительных результатов, удовлетворяющих требованиям, в таблицу.

На основе представленного алгоритма была разработана программа ExrAT для выполнения вычислительного эксперимента по проверке применимости ТПЭЛ-индикаторов в авиационной технике и анализа полученных результатов. Интерфейс программы ExrAT представлен на рисунке 3.

Программа составлена в среде разработки Borland Delphi 7 с использованием императивного, структурированного, объектно-ориентированного языка программирования Delphi. Программный продукт позволяет выполнять автоматизированный вычислительный эксперимент с заданными параметрами, выделить и записать проектные решения, удовлетворяющие условиям эксперимента и разработанной математической модели, а также провести анализ полученных результатов. Программа позволяет графически отобразить найденные проектные решения. При этом если на оси абсцисс всегда отмечается общая толщина ТПЭЛ-индикатора, то на оси ординат можно определить различные

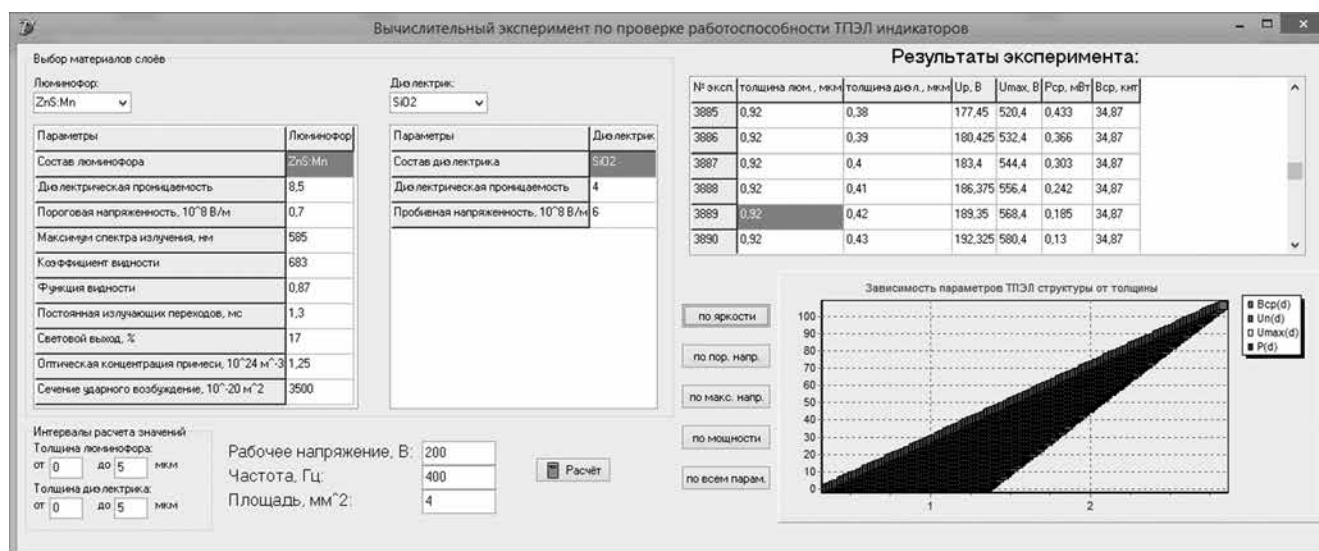


Рис. 3. Интерфейс программы ExrAT после выполнения вычислений и вывода результатов

параметры отображения: среднюю яркость, пороговое напряжение, максимально допустимое напряжение, среднюю мощность – или одновременно все параметры, отнесенные к своему максимальному значению.

Разработанная система представляет собой прикладное программное обеспечение, запускаемое из операционной системы Windows. Программа работает непосредственно с пользователем, устанавливая необходимые связи для проведения расчета.

Окно программы разделено на три области:

- область задания параметров эксперимента (слева на рисунке 3), включающая выбор материалов слоев, условий эксплуатации, интервалов расчета слоев люминофора;

- область отображения результатов вычисления (справа сверху на рисунке 3), представляющая собой таблицу со следующими столбцами: № эксперимента, толщина люминофора, толщина диэлектрика, пороговое напряжение, максимально допустимое напряжение, средняя мощность, средняя яркость;

- область графического отображения найденных проектных решений (справа внизу на рисунке 3). На данном графике на оси абсцисс отмечается общая толщина ТПЭЛ-индикатора (складываются толщина люминофора и двух слоев диэлектрика). Ось ординат определяется в зависимости от нажатых кнопок. При нажатии кнопки «по яркости» на оси ординат отображается средняя яркость, при нажатии кнопки «по пор. напр.» – пороговое напряжение, при нажатии кнопки «по макс. напр.» – максимально допустимое напряжение, при нажатии кнопки «по мощности» – средняя мощность, при нажатии кнопки «по всем парам.» – одновременно относительные значения всех параметров, относятся они к своему максимальному значению.

Разработанный программный продукт позволил провести вычислительный эксперимент по проверке применимости ТПЭЛ-индикаторных устройств в авиационной технике. Результатом проведенного экспери-

мента является подтверждение возможности решения данной проблемы.

В качестве особенностей выполнения условий применимости следует отметить также совокупность следующих полученных выводов:

- 1) яркость свечения ТПЭЛ-индикаторов увеличивается с увеличением толщины пленок;
- 2) число проектных решений, удовлетворяющих условиям поиска, уменьшается с увеличением толщины пленок;
- 3) для выбранных параметров эксплуатации толщины слоев ТПЭЛ-индикатора не могут превышать 3 мкм;
- 4) наилучшие решения достигаются при толщинах пленки около 1,5 мкм.

На основе вышеперечисленного можно заключить, что применение ТПЭЛ-технологии для производства дисплеев в авиационной технике возможно, но требует очень точных систем напыления слоев с толщинами не более 2–3 мкм, либо следует применять средства преобразования напряжения до более высоких показателей по амплитуде и частоте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения вычислительного эксперимента по проверке применимости ТПЭЛ-индикаторных устройств в авиационной технике были показаны варианты конструкций тонкопленочных излучающих структур, удовлетворяющие условиям эксплуатации индикаторов в авионике.

Представленная методика и разработанный на ее основе программный продукт могут быть использованы в лабораториях и конструкторских бюро, занимающихся проектированием и исследованием электролюминесцентных источников излучения, а также в промышленном секторе, занятым в области производства авиационной техники.

Также важно отметить, что разработанный программный продукт является достаточно универсальным

инструментом для проведения вычислительного эксперимента по проверке применимости ТПЭЛ-индикаторов в прочей специализированной технике. Для этого необходимо ввести в окне программы соответствующие ограничивающие конкретные условия для эксплуатации устройства и проанализировать полученные результаты расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсевичев Д.А., Борисов В.Е. Концепция применения тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств в системах наземной связи // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : матер. 19-й Всерос. молодеж. науч. школы-семинара, Ульяновск, 6–8 декабря 2016 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. С. 229–230.
 2. Тонкопленочные электролюминесцентные дисплеи как качественное решение для промышленных систем отображения информации // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2016. – № 5 (65). – URL: <http://www.isup.ru/articles/15/9897/>.
 3. Мониторы – технологии и рекомендации по выбору. – URL: http://www.ixbt.com/video/monitor_guide.html.
 4. Евсевичев Д.А., Самохвалов М.К. Автоматизация расчета эргономических параметров средств отображения информации на рабочем месте авиадиспетчера // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 3 (49). – С. 70–78.
 5. Евсевичев Д.А., Самохвалов М.К. Автоматизация исследования материалов люминофоров и диэлектриков в тонкопленочных электролюминесцентных индикаторах // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 55–57.
 6. Гусев А.И., Самохвалов М.К. Электрические характеристики тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов. – Ульяновск : УлГТУ, УВВИУС, 2006. – 125 с.
 7. Самохвалов М.К. Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – 117 с.
 8. Горбунов-Посадов М.М. Расширяемые программы. – М. : Полиптих, 1999. – 336 с.
 9. Евсевичев Д.А., Максимова О.В. Компьютерное моделирование, исследование и проектирование тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – 107 с.
- REFERENCES
1. Evsevichev D.A., Borisov V.E. Kontseptsiia primeneniia tonkoplenochnykh elektroluminestsentnykh indikatornykh ustroystv v sistemakh nazemnoi svyazi [The Concept of Thin-Film Electroluminescent Indicator Application in Ground Communication Systems]. *Aktualnye problemy fizicheskoi i funktsionalnoi elektroniki. Mater. 19-i Vseros. molodezh. nauch. shkoly-seminara* [Actual Problems of Physical and Functional Electronics in Proc. of the 19th Russian Youth Scientific School-Seminar]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2016, pp. 229–230.
 2. Tonkoplenochnye elektroluminestsentnye displei kak kachestvennoe reshenie dlia promyshlennykh sistem otobrazheniia informatsii [Thin-Film Electroluminescent Displays as a Qualitative Solution for Industrial Information Display Systems]. *Informatizatsiia i sistemy upravleniia v promyshlennosti* [Informatization and Control Systems in Industry], 2016, no. 5 (65). Available at: <http://www.isup.ru/articles/15/9897/>.
 3. *Monitory – tekhnologii i rekomendatsii po vyboru* [Monitors: Technologies and Recommendations on Selection]. Available at: http://www.ixbt.com/video/monitor_guide.html.
 4. Evsevichev D.A., Samokhvalov M.K. Avtomatizatsiia rascheta ergonomicheskikh parametrov sredstv otobrazheniia informatsii na rabochem meste aviadispatchera [Automated Calculation of Ergonomic Parameters of the Information Display Means at the Workplace of the Air Traffic Controller]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 3 (49), pp. 70–78.
 5. Evsevichev D.A., Samokhvalov M.K. Avtomatizatsiia issledovaniia materialov liuminoforov i dielektrikov v tonkoplenochnykh elektroluminestsentnykh indikatorakh [Automation of Phosphor and Dielectric Material Investigation in Thin-Film EL Indicators]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2011, no. 9, pp. 55–57.
 6. Gusev A.I., Samokhvalov M.K. *Elektricheskie kharakteristiki tonkoplenochnykh elektroluminestsentnykh indikatorov* [Electrical Characteristics of Thin-Film Electroluminescent Displays]. Ulyanovsk, UISTU, UVVIUS Publ., 2006. – 125 p.
 7. Samokhvalov M.K. *Tonkoplenochnye elektroluminestsentnye istochniki izlucheniia* [Thin-Film Electroluminescent Radiation Sources]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 1999. 117 p.
 8. Gorbunov-Posadov M.M. *Rasshiriaemye programmy* [Expandable Programs]. Moscow, Poliptikh Publ., 1999. 336 p.
 9. Evsevichev D.A., Maksimova O.V. *Kompiuternoe modelirovanie, issledovanie i proektirovanie tonkoplenochnykh elektroluminestsentnykh indikatorov* [Computer Simulating, Researching and Designing of Thin-Film Electroluminescent Indicators]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2016. 107 p.