

УДК 681.883.7

Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова, М.К. Самохвалов

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИНДИКАТОРОВ

**Евсевичев Денис Александрович**, аспирант Ульяновского государственного технического университета, окончил УлГТУ по специальности «Проектирование и технология электронных средств». Имеет статьи, свидетельства о регистрации программ в области оптоэлектроники и схемотехники. [e-mail: denistk\_87@mail.ru].

**Максимова Оксана Вадимовна**, кандидат технических наук, окончила УлГТУ по специальности «Проектирование и технология электронных средств», доцент кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии в области оптоэлектроники и СВЧ-техники. [e-mail: first32007@yandex.ru].

**Самохвалов Михаил Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор, окончил Саратовский государственный университет по специальности «Полупроводники и диэлектрики», заведующий кафедрой «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии в области оптоэлектроники. [e-mail: sam@ulstu.ru].

### Аннотация

Разработка и решение задач проектирования перспективных тонкопленочных электролюминесцентных (ТПЭЛ) дисплейных устройств являются актуальными задачами в области приборостроения. Разработка и оптимизация конструкции ТПЭЛ-индикатора являются комплексной задачей и требуют значительного труда проектировщика. Решение такой задачи может быть выполнено с использованием средств автоматизации. В связи с этим актуальными видятся разработки алгоритмов и программ расчета конструкции ТПЭЛ-индикаторов.

Ключевые слова: тонкие пленки, электролюминесценция, индикатор, проектирование.

**Denis Aleksandrovich Evsevichev**, Post-graduate Student at Ulyanovsk State Technical University; graduated from Ulyanovsk State Technical University with the speciality in Electronic Instrumentation Design and Technology; an author of articles in the field of optoelectronic and circuitry engineering; has certificate of registration of software in the same field of research. e-mail: denistk\_87@mail.ru.

**Oksana Vadimovna Maksimova**, Candidate of Engineering, graduated from Ulyanovsk State Technical University with the speciality in Electronic Instrumentation Design and Technology; Associate Professor at the Department of Electronic Instrumentation Design and Technology of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and monographs in the field of optoelectronic and microwave engineering. e-mail: first32007@yandex.ru.

**Mikhail Konstantinovich Samokhvalov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; graduated from Saratov State University with the speciality in Semiconductors and Dielectrics; a head of the Department of Electronic Instrumentation Design and Technology at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and monographs in the field of optoelectronics. e-mail: sam@ulstu.ru.

### Abstact

A development and a solution of designing problems of the advanced thin-film electroluminescent (TFEL) display devices is an important undertaking in the engineering field. The development and optimization of the TFEL display design is a complex task and requires a considerable work of the engineer. The solution of this problem can be accomplished by the use of automation means. Therefore, the development of the TFEL indicator design algorithm and calculation program is essential.

Key words: thin films, electroluminescence, display, design.

## ВВЕДЕНИЕ

Важными элементами человеко-компьютерного взаимодействия являются средства отображения информации, то есть устройства, обеспечивающие представление информации в виде, пригодном для зрительного восприятия. К средствам отображения информации относится индикаторная техника. Одними из наиболее перспективных являются ТПЭЛ-индикаторы, которые занимают особое место среди активных индикаторных устройств (ИУ) благодаря своему высокому быстродействию и широкому диапазону рабочих температур.

Наряду с ТПЭЛ-индикаторами, интерес исследователей в области дисплейной техники вызывают технологии производства индикаторов на основе органических светоизлучающих диодов и жидких кристаллов.

Проведенный сравнительный анализ этих индикаторов [1] позволил определить, что ТПЭЛ-дисплеи превосходят по светотехническим характеристикам жидкокристаллические дисплеи, однако уступают дисплеям на базе органических светодиодов, что, впрочем, компенсируется высокими конструкторско-технологическими параметрами (среднее время безотказной работы, диапазон рабочих температур, радиационная стойкость). Отсюда вытекает возможность применения ТПЭЛ-устройств не только в технике общего назначения, но и в военной, медицинской, космической технике, где предъявляются специфические, а порой и жесткие требования к аппаратуре [2].

Благодаря перечисленным достоинствам, ТПЭЛ ИУ находят широкое применение в средствах отображения информации.

Классическая ТПЭЛ-структура конденсатора состоит из пяти слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку [3]: проводящего нижнего, диэлектрического нижнего, люминесцентного, верхнего диэлектрического, верхнего проводящего.

Наличие двух диэлектрических слоев, отделяющих пленку люминофора от электродов, характеризует данное устройство как электролюминесцентный конденсатор, что определяет необходимость использовать переменное напряжение для возбуждения электролюминесценции. Для электролюминесцентных структур с малой плотностью свободных носителей заряда в люминофоре в слабых полях приложенное напряжение распределяется между пленками люминофора и диэлектриков в соответствии со значениями их геометрических емкостей. Таким образом, чем больше емкость диэлектриков, тем большая часть общего напряжения падает на слой люминофора. Главная роль диэлектрических слоев заключается в ограничении заряда, проходящего через люминофор в рабочих режимах [4]. Необходимость применения таких слоев обусловлена физической природой процесса переноса заряда в люминесцентной пленке. Электролюминесценция в тонких слоях люминофоров связана с электрическим пробоем пленок.

Кроме рассмотренной классической конструкции, при производстве ТПЭЛ ИУ могут быть спроектированы другие типы источников излучения, имеющие меньшее число диэлектрических слоев (к достоинствам ИУ таких типов относятся, как правило, меньшие значения управляюще-

го напряжения, а к недостаткам – более низкая яркость и светоотдача, меньшая надежность).

Такие особенности ТПЭЛ-структуры заставляют применять к материалам диэлектриков широкий круг требований. К ним, кроме высокой диэлектрической проницаемости и электрической прочности, относятся требования к механическим, тепловым, оптическим, физико-химическим и технологическим свойствам [4].

К люминофорам различных цветов свечения предъявляются такие основные требования, как высокая светоотдача, высокая яркость, совместимость технологии получения с другими элементами индикатора, низкие напряжения возбуждения, большой срок службы и ряд других [4].

С учетом предъявляемых требований к конструкциям ТПЭЛ-индикаторов и к материалам их слоев, проектирование ТПЭЛ-структур и расчет их характеристик является комплексной задачей. С целью ее решения были разработаны методики проведения конструкторского проектирования, а также разработана система автоматизации проектирования ТПЭЛ-индикаторов.

## 1 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТПЭЛ ИУ

Процесс проектирования ТПЭЛ ИУ заключается в принятии проектных решений, обеспечивающих выполнение разрабатываемым индикатором предъявляемых к нему требований.

Конструкторское проектирование индикатора включает следующие этапы (рис. 1): разработка и анализ технического задания на проектируемый индикатор, структурный синтез и анализ конструкции индикатора, параметрический синтез и анализ спроектированной конструкции, разработка комплекта конструкторской документации.

Синтез ТПЭЛ ИУ является основой проектирования. От качества выполнения процедуры синтеза (по различным критериям) зависят свойства и общее качество разрабатываемого индикатора. Анализ спроектированного ТПЭЛ ИУ также является составной частью проектирования,

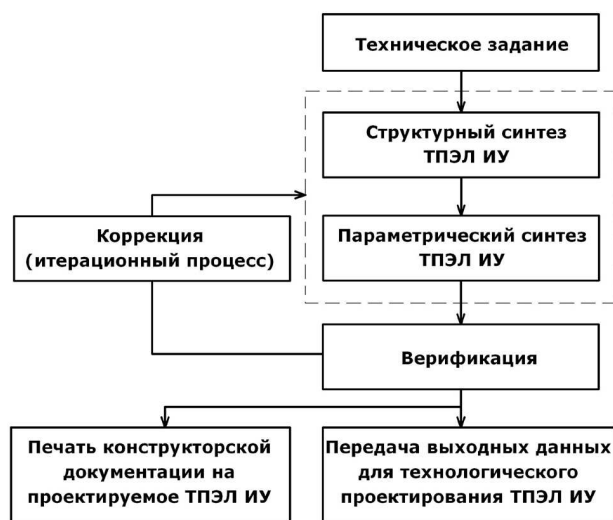


Рис. 1. Процесс проектирования ТПЭЛ ИУ

служащей для верификации принимаемых проектных решений. Анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе проектирования [5]. Такие функциональные особенности процессов синтеза и анализа ТПЭЛ ИУ свидетельствуют о неразрывной связи между ними при выполнении конструкторского проектирования ТПЭЛ-индикаторов.

Как видно по рисунку 1 и согласно [5], синтез ТПЭЛ ИУ подразделяется на параметрический и структурный. Проектирование начинается со *структурного синтеза*, при котором генерируется принципиальное решение. Таким решением является выбор конструкции индикатора и материалов слоев (люминесцентных и диэлектрических) и их свойств. Очевидно, что задача синтеза структуры является сложноформализуемой задачей. Сложность заключается, прежде всего, в наличии большого числа факторов, влияющих на разновидности, свойства и параметры синтезируемых ТПЭЛ-структур. Для описания множества структурных решений наиболее удобным является использование морфологического И-ИЛИ-графа (рис. 2).

На рисунке 2 в прямоугольниках отображены способы включения и элементы ТПЭЛ-индикаторов. Сплошная линия означает связь типа «И» (компонент обязательно войдет в проектируемый индикатор), пунктирная линия – связь типа «ИЛИ» (войдет только один из набора вариантов).

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

Процесс структурного синтеза ТПЭЛ ИУ состоит из следующих этапов:

1) Формирование конструктивной альтернативы. На данном этапе производится выбор из базы данных материалов слоев по сформулированному поисковому набору правил и ограничений. Алгоритм структурного синтеза

ТПЭЛ ИУ на базе И-ИЛИ-деревьев требует введения правил выбора альтернатив в каждой вершине ИЛИ [5]. Эти правила отчасти имеют эвристический характер и определяются не только в соответствии с требованиями ТЗ, но и с требованиями, предъявляемыми проектировщиком. Набор правил и ограничений определяет выбор количества и физической принадлежности слоев проектируемой структуры ТПЭЛ-индикаторного элемента, выбор люминесцентных слоев в соответствии с ограничениями по светотехническим характеристикам, заданным в ТЗ, выбор диэлектрических и люминесцентных слоев в соответствии с ограничениями по электрическим параметрам, заданным в ТЗ.

По имеющемуся комплексу исходных данных из баз данных материалов слоев выбираются те элементы, для которых выполняются условия применимости, определяемые набором правил и ограничений.

2) По заданным правилам и ограничениям на проектирование ТПЭЛ-индикаторного элемента возможно формирование вектора критериев. По данному вектору можно оценить соответствие полученной альтернативы поставленным целям. Данный этап включает проведение верификации сформированной конструкции. Структурная верификация включает проверку изоморфности графов, сформированных на основе выбранных в ручном или автоматизированном режиме элементарных слоев и итоговой структуры. Верификация параметров проверяет соответствие электрических и светотехнических параметров слоев структуры заданным диапазонам параметров, сформированных на этапе выбора правил и ограничений.

3) После выполнения верификации происходит принятие решения относительно перехода к следующей альтернативе или прекращения поиска. Данное решение принимается автоматически по завершении рассмотрения всех возможных альтернатив.

Следующим этапом проектирования является выполнение *параметрического синтеза* сформированной конструкции.

Задача параметрического синтеза ИУ заключается в определении наилучших значений конструктивных параметров для выбранной структуры объекта с учетом всех требований ТЗ (рабочий диапазон электрических и светотехнических параметров) на проектируемый индикатор.

Детерминированная постановка задачи оптимизации заключается в задании условий работоспособности на выходные параметры при заданных номинальных значениях входных параметров, к которым относятся электрические и светотехнические параметры проектируемого индикатора, указанные в ТЗ.

Для формирования и решения такого типа задачи

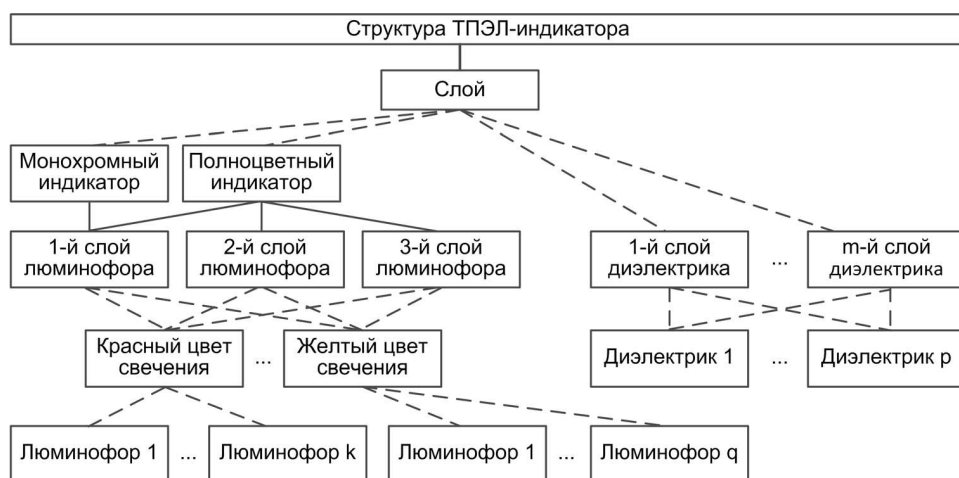


Рис. 2. Морфологическое И-ИЛИ-дерево структуры ТПЭЛ-индикатора

необходимо формирование целевой функции  $F(X)$ , отражающей качество функционирования проектируемого ТПЭЛ-индикатора и нахождение его экстремума. Для рассматриваемых индикаторов такими функциями выступают функция зависимости порогового напряжения ТПЭЛ-индикаторного элемента от толщин люминесцентных и диэлектрических слоев (1) и функция зависимости максимальной яркости ТПЭЛ-индикаторного элемента от толщин люминесцентных слоев (2).

$$F_1(X) = U_n(d_{л1}, \dots, d_{лn}, d_{д1}, \dots, d_{дm}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $U_n$  – пороговое напряжение ТПЭЛ-индикаторного элемента;

$d_{л1}, \dots, d_{лn}$  – толщины люминесцентных слоев;

$d_{д1}, \dots, d_{дm}$  – толщины диэлектрических слоев.

$$F_2(X) = B_0(d_{л1}, \dots, d_{лn}) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $B_0$  – максимальная яркость ТПЭЛ-индикаторного элемента.

Эти характеристики определяют такие параметры ТПЭЛ-индикатора, как средняя мощность, средняя яркость, продолжительность свечения источника излучения. Задачу параметрического синтеза ИУ можно представить как задачу нахождения вектора  $(d_{л1}, \dots, d_{лn}, d_{д1}, \dots, d_{дm})$ , который определяет экстремумы целевых функций при заданных ограничениях. Для решения поставленной многокритериальной задачи был использован метод выделения главного критерия –  $F_1(X)$ . Данная функция была выбрана, так как она отражает зависимость от всех конструктивных параметров проектируемого ТПЭЛ ИУ. Нахождение экстремума (минимума) функции  $F_1(X)$  осуществляется методом идеальной точки с использованием штрафных функций, который заключается в отыскании точки, бли-

жайшей к целевой, сочетающей глобальное наилучшее значение для всех критериев.

На основе представленных методик были разработаны алгоритмы проведения структурного и параметрического синтеза ТПЭЛ-структур, реализованные в программном продукте IDECSOft.

## 2 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТПЭЛ ИУ

Программа IDECSOft (рис. 3) написана на языке Object Pascal в среде Delphi 7 и представляет собой средство автоматизированного проектирования ТПЭЛ-индикаторов и расчета их основных функциональных характеристик и параметров. Программа выполнена в виде исполняемого файла, который запускается из операционной системы.

Окно программы разделено на три области:

1. Область управления проектом, представляющая собой набор функциональных кнопок (их наименования: «Задать параметры расчета», «Редактировать параметры», «Расчет», «Сохранить отчет», «Маршрутная карта»), задействованных на всех этапах проектирования ТПЭЛ-индикатора.

2. Область «Исходные данные» отображает входные параметры, необходимые для расчета конструкции ТПЭЛ-структуры.

3. Область расчета отображает выходные данные по спроектированному устройству, в том числе значения толщин слоев люминофоров и диэлектриков, пороговое и максимальное напряжения, а также ряд светотехнических параметров ТПЭЛ-индикатора.

Разработанный программный продукт позволяет спроектировать индикаторное устройство по выбранным

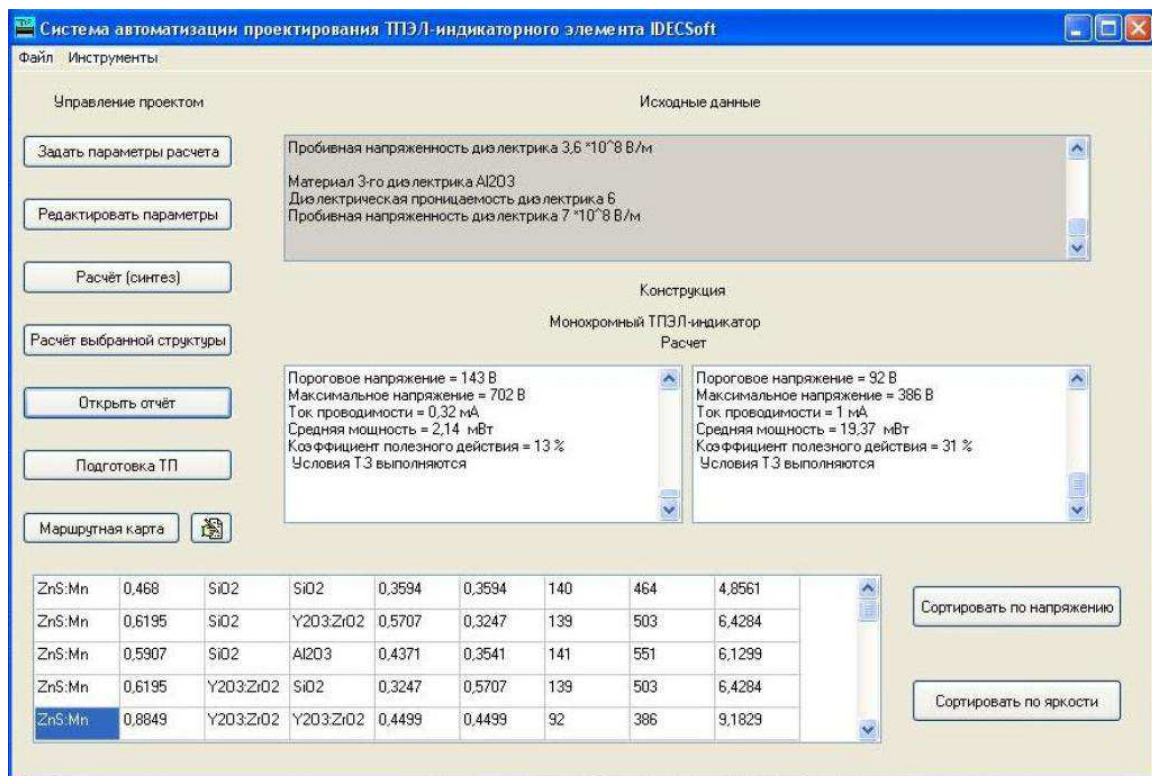


Рис. 3. Интерфейс программы IDECSOft после выполнения вычислений

оператором параметров расчета. Задание на проектирование можно реализовать как в режиме «Мастер», так и в результирующем окне технического задания.

Кнопка «Расчет» осуществляет структурный и параметрический синтез конструкции ТПЭЛ-индикатора. Особый интерес представляет программная реализация параметрического синтеза, позволяющая осуществлять поиск оптимального решения для каждой из альтернатив конструкций ТПЭЛ-индикатора.

Первым этапом является поиск нулевого приближения, то есть решений, не выходящих за область ограничений (листинг 1).

Программный код поиска минимума порогового напряжения при заданных ограничениях для ТПЭЛ-индикатора (листинг 2) включает расчет градиента целевой функции, поиск оптимального значения и проверку рассчитанных параметров.

```

EpdRes:=0;
Eps_dRes:=0;
cj:=1;
for cj:=1 to m do
begin
EpdResT:=Epd[cj];
Eps_dResT:=Eps_l/Eps_d[cj];
EpdRes:=EpdResT+EpdRes;
Eps_dRes:=Eps_dResT+Eps_dRes;
end;
cj:=1;
for cj:=1 to m do
dd[cj]:=0.015*Ua/(EpdRes-Epl*Eps_dRes);
dl:=(2*Ua-(1.5*Ua*EpdRes))/(EpdRes-Epl*Eps_dRes))/100*Epl;

```

Листинг 1. Поиск нулевого приближения для решения задачи параметрического синтеза конструкции ТПЭЛ-индикатора

```

cj:=1;
cx2:=1;
//Задание расчетных значений толщин
Promdd[cj]:=dd2[cj];
for cj:=1 to m do
Promdd[cj]:=dd2[cj];
Promdl:=dl2;
for cx2:=1 to 1000 do //выбранный оператор сокращает время расчета //конструктивных параметров ТПЭЛ-индикатора
begin
for cj:=1 to m do
//Расчет частных производных порогового напряжения по толщинам слоев
begin
DEpdRes:=Epl*Promdl;
DEps_dRes:=Promdl;
cjD:=1;
for cjD:=1 to m do
begin
DEpdResT:=Epd[cjD]*Promdd[cjD];
DEpdRes:=DEpdResT+DEpdRes;
DEps_dRes:=DEps_dRes+DEps_dResT;
end;
dFl:= 100000000*Epl+r*(Epl/100*Power((Ua-Epl*DEps_dRes*100),2)-Epl/100*Power(DEpdRes,2));
dFd[cj]:= Eps_l/Eps_d[cj]+ r*(Eps_l/Eps_d[cj]/Power((Ua-Epl*DEps_dRes*100),2)-Epd[cj]/100*Power((DEpdRes*100-Ua),2));
end;
//Определение новых расчетных значений толщин
cj:=1;
for cj:=1 to m do
Promdd[cj]:=Promdd[cj]-0.00001*dFd[cj];
Promdl:=Promdl-0.00001*dFl;
//Формализация ограничений
for cj:=1 to m do
begin
DEpdRes:=Epl*Promdl;
DEps_dRes:=Promdl;
cjD:=1;
for cjD:=1 to m do

```

```

begin
DEpdResT:=Epd[cjD]*Promdd[cjD];
DEps_dResT:=Eps_l*Promdd[cjD]/Eps_d[cjD];
DEpdRes:=DEpdResT+DEpdRes;
DEps_dRes:=DEps_dRes+DEps_dResT;
end;
dFl:= 100000000*Epl+r*(Epl/100*Power((Ua-Epl*DEps_dRes*100),2)-Epl/100*Power(DEpdRes,2));
dFd[cj]:= Eps_l/Eps_d[cj]+ r*(Eps_l/Eps_d[cj]/Power((Ua-Epl*DEps_dRes*100),2)-Epd[cj]/100*Power((DEpdRes*100-Ua),2));
end;
GradF:=0;
for cj:=1 to m do
begin
GradFT:=Power(dFd[cj],2);
GradF:=GradFT+GradF;
end;
GradF:=Power(dFl,2)+GradF;
GradF:=sqrt(GradF);
cj:= 1;
Umax2:=100*Epl*Promdl;
Up2:=100*Epl*Promdl;
for cj:= 1 to m do
begin
Umax2T:=100*Epd[cj]*Promdd[cj];
Up2T:=100*Eps_l*Promdd[cj]/Eps_d[cj];
Umax2:=Umax2+Umax2T;
Up2:=Up2+Up2T;
end;
cj:= 1;
//Проверка выполнения ограничений
for cj:= 1 to m do
begin
If ((Umax2>Ua) and (Up2<Ua) and (GradF>0.05) and (dl2>0) and (dd2[cj]>0)) then
begin
dd2[cj]:=Promdd[cj];
dl2:=Promdl;
end;
end;
end;

```

Листинг 2. Поиск минимума порогового напряжения ТПЭЛ-индикатора

```

//1. Расчет яркости
B0:= dl*(Nopt*10*Klmbd*N)/
(16*Lmbd*T);
//2. Расчет напряжений
cj:= 1;
Umax:=100*Epl*dl;
Up:=100*Epl*dl;
for cj:= 1 to m do
begin
UmaxT:=100*Epd[cj]*dd[cj];
UpT:=100*Epl*Eps_l*dd[cj]/
Eps_d[cj];
Umax:=Umax+UmaxT;
Up:=UpT+Up;
end;
//3. Расчет тока, средней мощности,
КПДw:=2*3.1416*f;
cj:= 1;
EpsRes:=0;
for cj:= 1 to m do
begin
EpsResT:=dd[cj]/Eps_d[cj];
EpsRes:=EpsRes+EpsResT;
end;
Ia:=8.85*S*w*Ua/
(EpsRes*100000000);
P:=3540*f*S*Epl*dl*(Ua-Up)/
(EpsRes*100000000);
KPD:=0.64*(Ua-Up)/Ua;
//Округление результатов
dl:=Round(10000*dl);
dl:=dl/10000;
cj:=1;
for cj:=1 to m do
begin
dd[cj]:=Round(10000*dd[cj]);
dd[cj]:=dd[cj]/10000;
end;
B0:=Round(10000*B0);
B0:=B0/10000;
Up:=Round(Up);
Ia:=Round(100*Ia); Ia:=Ia/100;
P:=Round(100*P); P:=P/100;
Umax:=Round(Umax);
KPD:=Round(100*KPD);

```

Листинг 3. Расчет функциональных параметров ТПЭЛ-индикатора

Аналогично записывается программа поиска экстремума целевой функции яркости в зависимости от толщины люминофора.

Для сформированной конструкции ТПЭЛ-индикатора рассчитываются основные функциональные параметры (листинг 3).

Результаты вычислений представляются на главной странице программы и в отдельном окне в виде отчета, который можно сохранить в формате pdf или сразу распечатать.

В состав программного продукта входит модуль TFEL ARSM, вызываемый через главное меню программы – подменю «Инструменты». Модуль позволяет проводить исследование конструкций ТПЭЛ-индикаторов. Интерфейс модуля содержит область выбора материала люминофора и диэлектрика, область задания параметров конструкции и исследования и расчетную область, где отображаются результаты вычислений. Подробная работа модуля описана в [6].

Модуль «Таблица материалов», также вызываемый через подменю «Инструменты», содержит две вкладки с таблицами свойств и параметров материалов люминофоров и диэлектриков. Таблицы компонуются по составленным базам данных, управляемым СУБД на основе Paradox.

С целью оценки разработанного программного продукта IDECSoft была проведена его апробация в учебно-лабораторном комплексе на базе кафедры «Проектирование и технология электронных средств» ФГБОУ ВПО

Ульяновского государственного технического университета. Проведенные экспериментальные исследования пятислойных образцов ТПЭЛ-индикатора с установленной площадью пикселя и определенными в программе оптимальными толщинами слоев позволили измерить основные электрические и светотехнические параметры сформированных ТПЭЛ-структур. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов, полученными в автоматизированном режиме с использованием разработанной программы IDECSoft, позволило оценить точность расчета и определить область адекватности функциональных параметров, не превышающую допустимого значения в 5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные методики и разработанный на их основе программный продукт обеспечивают автоматизацию проектирования ТПЭЛ ИУ и расчетов основных функциональных характеристик и параметров. Апробация программного обеспечения IDECSoft подтвердила соответствие полученных при автоматизированном проектировании ТПЭЛ-индикаторов данных теоретическим расчетам светотехнических и электрических параметров.

Полученные в результате выполнения данной работы выводы и результаты могут быть использованы в лабораториях и конструкторских бюро, занимающихся проектированием и исследованием электролюминесцентных источников излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсевичев Д.А., Максимова О.В. САПР тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов // Вестник МГОУ. Сер. «Физика – математика». – М. : МГОУ, 2012. – № 2. – С.131–135.
2. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Исследование процессов проектирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов для автоматизации расчетов их функциональных характеристик // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического института). – СПб. : Санкт-Петербургский государственный технологический институт, 2011. – № 10 (36)/2011. – С. 99–104.
3. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Исследование влияния конструктивных параметров тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов на режимы их работы для формирования математического обеспечения САПР // Вестник МГОУ. Сер. «Физика – математика». – М. : МГОУ, 2012. – № 1. – С.85–92.
4. Максимова О.В., Самохвалов М.К. Разработка методов анализа и синтеза тонкопленочных электролюминесцентных элементов в индикаторных устройствах. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 101 с.
5. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.
6. Евсевичев Д.А., Самохвалов М.К. Автоматизация исследования материалов люминофоров и диэлектриков в тонкопленочных электролюминесцентных индикаторах // Автоматизация в промышленности. – М. : ИнфоАвтоматизация, 2011 – № 9. – С. 55–57.