

УДК 628.932

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРЦЕВОГО ПОДСВЕТА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСПЛЕЯ

© 2019 Д.В. Харькин, И.П. Ефимов, Д.Ш. Алимова

АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»

Статья поступила в редакцию 04.02.2019

В статье рассматриваются вопросы светотехнического проектирования торцевого подсвета жидкокристаллического дисплея. Рассмотрен метод моделирования торцевых светодиодных подсветов. Разработанные математические модели позволяют снизить трудоемкость светотехнического расчета торцевого подсвета. Появляется возможность рассчитать параметры световода на первоначальном этапе разработки.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, источник света, световод, микроструктуры, рассеиватель, торцевой подсвет.

ВВЕДЕНИЕ

подавляющее большинство современных систем автоматизированного управления технологическими процессами имеют в своем составе средства отображения информации. Ранее в качестве средств отображения информации использовались лампы-индикаторы и стрелочные приборы. В настоящее время средства отображения представляют собой полноцветные мониторы. На указанные средства отображения информации выводится чаще всего оперативная информация в виде мнемосхем, трендов, таблиц или информация, передаваемая с видеокамер. При этом значительное распространение среди таких устройств отображения информации получили жидкокристаллические дисплеи (ЖК-дисплеи), которые обладают существенными преимуществами (масса, габариты, потребляемая мощность, цена) по сравнению с другими дисплеями. Основной проблемой при разработке и изготовлении ЖК-дисплеев является обеспечение требуемых светотехнических параметров и характеристик [1]. Одни из наиболее важных светотехнических параметров – это яркость и равномерность яркости по всему полю экрана [2].

При этом ЖК-дисплеи не обладают способностью к свечению. Принцип их работы основан на пропускании поляризованного света опре-

деленных длин волн за счет поворота жидких кристаллов под действием электрического поля. Поэтому одной из важнейших задач при разработке и изготовлении ЖК-дисплеев в коммерческой технике и особенно в промышленных системах управления является разработка узлов подсвета ЖК-дисплеев с высокими показателями яркости и ее равномерности. В настоящее время в качестве источника света в ЖК-дисплеях используются преимущественно светодиоды [3, 4]. При этом наиболее часто применяются белые светодиоды [5, 6]. Имеются различные варианты построения заднего подсвета ЖК-дисплеев.

С развитием программ светотехнического моделирования появилась возможность проектирования модулей подсвета с использованием световодов. Световоды представляют собой прозрачные стеклянные или органические пластины с нанесенными на заднюю поверхность микроструктурами – матированными площадками различной формы или элементами в виде вогнутых линз круглой или квадратной формы. Расположение или размер микроструктур рассчитывается с помощью специальной программы светотехнического моделирования. При этом, чем больше площадь микроструктур на единицу площади основания световода, тем больший световой поток направляется в противоположную сторону. Основной принцип при проектировании световодов: чем дальше от источника света точка световода, тем больше должна быть площадь микроструктур на единицу поверхности световода [7].

Подсветы ЖК-дисплеев с использованием световодов называются торцевыми [8] подсветами из-за характерного расположения источника света относительно ЖК-дисплея. При применении торцевого подсвета ЖК-дисплею необходим диффузный рассеиватель с небольшой плотностью около 90 %. Типовая конструкция ЖК-дисплея с торцевым подсветом показана на рисунке 1 [2].

Харькин Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, начальник научно-исследовательского отдела АО «УКБП». E-mail: hardim@mail.ru

Ефимов Иван Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. E-mail: eip@ulstu.ru

Алимова Динара Шаукатовна, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, начальник комплексной тематической бригады научно-исследовательского отдела АО «УКБП». E-mail: dinalimova@icloud.com

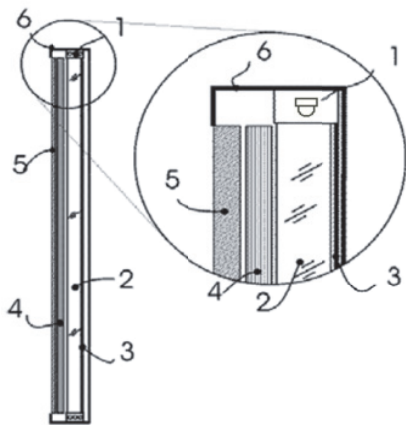


Рис. 1. Типовая конструкция ЖК-дисплей с торцевым подсветом
1 – светодиоды; 2 – световод; 3 – отражатель;
4 – рассеиватель; 5 – жидкокристаллическая матрица;
6 – корпус

Торцевой подсвет обладает рядом достоинств по сравнению с прямым подсветом:

- малые габариты;
- низкая себестоимость;
- более высокая световая эффективность вследствие применения рассеивателя с малой плотностью.

В связи с использованием меньшего количества источников света (по сравнению с фронтальными подсветами):

- более высокая надежность;
- более простая схема управления питанием.

Недостатки торцевого типа подсвета:

- необходимость проведения светотехнического моделирования при проектировании элементов конструкции (световодов).

Коэффициент полезного действия светодиода подсвета определяется световой эффективностью. Световая эффективность оптического излучения (иногда называемая функцией яркости или люмен-эквивалентом), измеряемая в люменах на ватт оптической мощности, представляет собой коэффициент преобразования оптической мощности в световой поток [4]. В случае с торцевым подсветом, так как источники света сконцентрированы по торцам световода с одной или двух сторон, возникает необходимость получения равномерного распределения светового потока по полю ЖК-дисплея. Построение математических моделей для обеспечения высокой равномерности свечения является важной научно-технической задачей.

ОПИСАНИЕ СВОТТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДСВЕТА ЖК-ДИСПЛЕЯ

При проведении светотехнического моделирования используется следующий подход. Строится упрощенная светотехническая модель. В современных системах автоматизированного

проектирования (САПР) строится визуально отображаемая 3D модель в следующей последовательности:

1) Создается источник света (source) [9] с требуемыми характеристиками:

- световой поток;
- геометрические размеры;
- угловое распределение света;
- количество испускаемых лучей.

2) Создается геометрическая модель подсвета: отражатели, рассеиватели, световоды, экран или приемник.

3) Добавляются из созданной библиотеки необходимое количество источников света.

Для каждого элемента задаются собственные параметры. При этом большинство светотехнических программ требует определения, как минимум, двух свойств. Свойство материала (Material) [9] геометрической модели и свойство покрытия (Surface) [9].

Для большинства геометрических элементов, участвующих в расчетах достаточно определения идеальных свойств поверхности, например: идеальное поглощение, идеальное рассеивание.

Для ответственных геометрических элементов таких как световод, создаются максимально приближенные к реальности параметры.

Световод, применяемый для торцевого подсвета, требует определение дополнительного свойства – микроструктур (RepTile) [9]. В свойстве описывается геометрическое расположение, размер микроструктур и отражающие свойства.

4) Определяются изменяемые параметры. Параметры, допускающие изменение при различных итерациях расчетов для получения оптимальных характеристик:

- расстояние между источниками света;
- расстояние от источника света до боковой грани световода;
- количество источников света;
- распределение микроструктур на плоскости световода.

В случае торцевого подсвета наиболее часто оптимизируемым параметром является распределение микроструктур.

5) Выбирается тип приемника светового излучения.

Для определения равномерности используется распределенный приемник светового излучения по площади соразмерный с размером подсвета.

Для измерения яркости используется точечный приемник светового излучения, т.е. размеры приемника гораздо меньше площади подсвета.

6) Проводится моделирование.

Первичное распределение микроструктур на плоскости световода создается на основании опыта разработчика. Распределение микроструктур на плоскости световода в зависимости от расположения источников света показано на рисунках 2, 3.

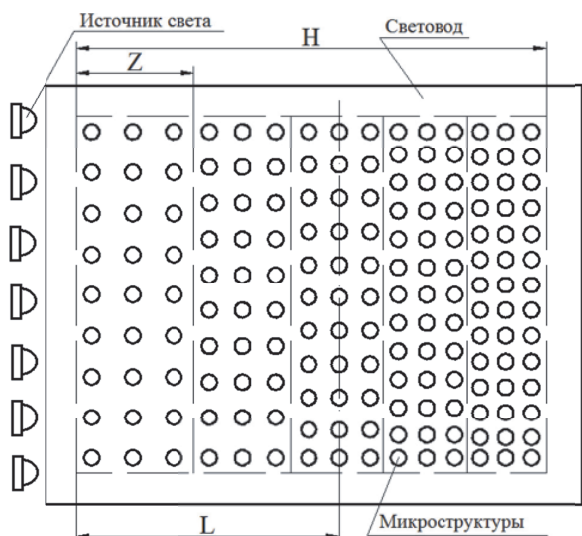


Рис. 2. Вид световода с односторонним расположением источников света:

Н – ширина рабочей области световода;
 Z – зона световода; L – световой путь световода

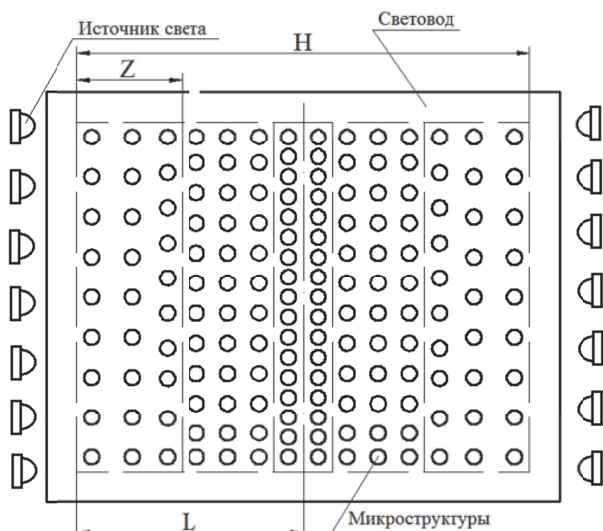


Рис. 3. Вид световода с двухсторонним расположением источников света:

Н – ширина рабочей области световода;
 Z – зона световода; L – световой путь световода

Проводится первичное моделирование в светотехнической программе. На основании полученной равномерности яркости по полю световода проводится корректировка распределения микро-

структур и выполняется очередная итерация моделирования. Далее методом последовательного приближения добиваются требуемой равномерности яркости по полю световода. На одну итерацию светотехнического моделирования, в связи с необходимостью обработки объемного массива данных, требуется большое количество машинного времени. На одну итерацию моделирования распределения светового потока с изменением исходных данных может затрачиваться до 1,5 часов. На получение требуемой равномерности яркости может потребоваться от 15 до 30 итераций. Поэтому количество итераций при расчете влияет на время получения приемлемой светотехнической модели и на разработку изделия в целом. Меньшее количество итераций моделирования можно обеспечить с помощью аналитического расчета для получения начального распределения микроструктур. В этом случае при проведении первичного моделирования будут получены приближенные к оптимальным результаты равномерности яркости и достаточно провести оптимизацию в несколько итераций, чтобы обеспечить оптимальный результат.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЕТОДИОДНОГО ПОДСВЕТА

При разработке математической модели, в качестве исходных данных были взяты результаты моделирования, полученные эмпирическим путем, подтвержденные изготовлением реальных образцов (таблица 1). По изменению плотности микроструктур в зависимости от расстояния до источника света для изделий (таблица 1) построены графические зависимости. В качестве примера показаны графические зависимости плотности микроструктур от светового пути для типоразмеров 9" x 7" и 15,4" по диагонали на рисунках 4, 5 соответственно.

Полученные зависимости плотности микроструктур аппроксимированы с помощью аналитических формул. Получены следующие аналитические зависимости плотности микроструктур от типоразмеров световодов:

$$d = \frac{L^{k1}}{k2} + k3, \quad (1)$$

где L – длина светового пути (рисунок 2);

k1, k2, k3 – эмпирически подобранные коэффициенты (таблица 1).

Таблица 1. Эмпирически подобранные коэффициенты

Типоразмер модуля подсвета	k1	k2	k3	k4
5" x 4" (6,5" по диагонали)	0,8	72	0,2	0,5
6" x 8" (10,4" по диагонали)	1,2	439	0,15	0,55
9" x 7" (12" по диагонали)	1,35	1198	0,13	0,5
12" x 9" (15" по диагонали)	1,65	5200	0,1	0,55
13" x 8,1" (15,4" по диагонали)	2,5	1000000	0,08	0,5

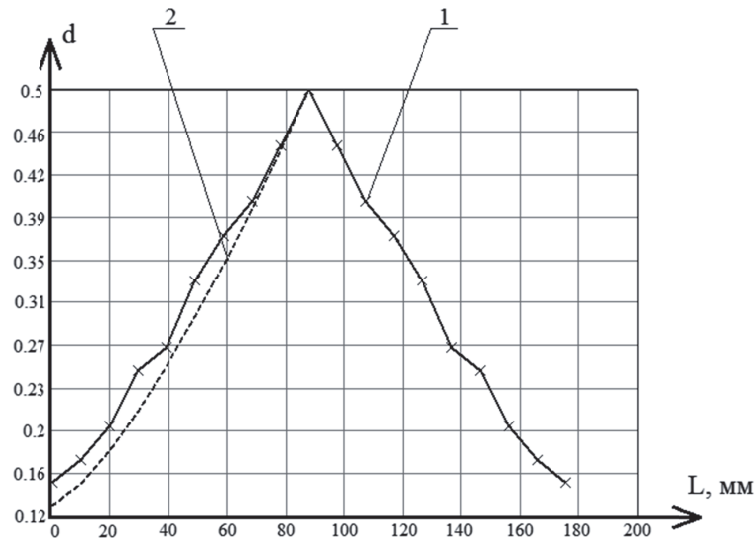


Рис. 4. Зависимость плотности микроструктур от светового пути для типоразмера 9" x 7":
1 – эмпирическая зависимость плотности микроструктур от светового пути;
2 – аппроксимированная зависимость плотности от светового пути

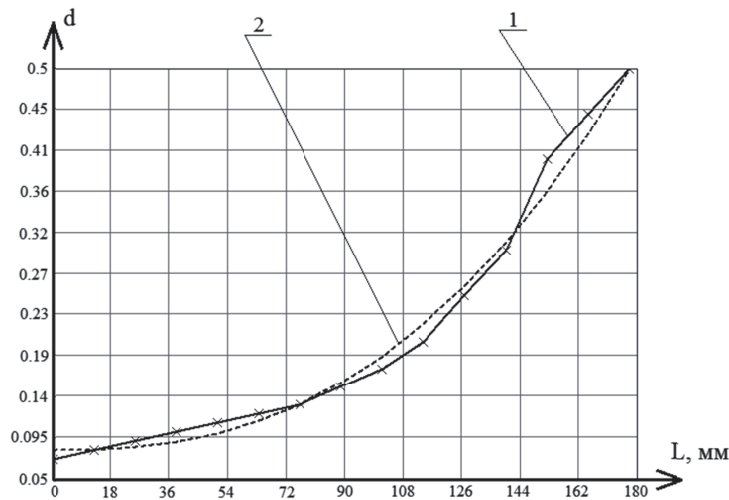


Рис. 5. Зависимость плотности микроструктур от светового пути для типоразмера 15,4" по диагонали:
1 – эмпирическая зависимость плотности микроструктур от светового пути;
2 – аппроксимированная зависимость плотности от светового пути

Примеры зависимостей построенных по формуле (1) для типоразмеров 9" x 7" и 15,4" по диагонали показаны на рисунках 4, 5 соответственно.

По формуле (1) в программе светотехнического моделирования были созданы модели распределения плотности микроструктур в зависимости от светового пути и проведено светотехническое моделирование. Равномерность яркости при этом соответствовала предъявляемым требованиям и в некоторых случаях имела более высокую равномерность по сравнению с эмпирически подобранным распределением.

Коэффициент k_2 является поправочным коэффициентом и обеспечивает совмещение верхней и нижней точек зависимостей.

При соответствии по форме и наклону аппроксимированной графической зависимости, необходимо математически определить k_2 для

совмещения верхней и нижней точек указанной зависимости с верхними и нижними точками эмпирически подобранных зависимостей. Приравняв формулу (1) значению верхней точки графика типоразмера 9" x 7" $d = 0,5$, k_2 будет равен:

$$\frac{L^{1,35}}{k_2} + k_3 = 0,5, \quad (2)$$

$$\frac{L^{k_1}}{k_2} = 0,5 - k_3, \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{L^{k_1}}{0,5 - k_3}. \quad (4)$$

Подобранные эмпирически коэффициенты для типоразмера 9" x 7": $k_2=1200$, $k_3=0,13$. Далее необходимо для полученных значений определить физический смысл L .

Отсюда $L^{1,35}(0,5)$ равен 419,362, $L(0,5)$ равен 87,631. Полученное значение равно длине светового пути за вычетом коэффициента определяющегося зонами световода. Зона световода

(Z) - это поле световода разделенное на участки с одинаковой плотностью микроструктур (рисунки 2, 3). Количество зон световода должно быть таким, чтобы обеспечивалась плавность перехода яркости от одной зоны к другой. Для световодов размерами до 15,4° по диагонали, для обеспечения требуемой плавности перехода от одной зоны к другой, достаточно делить световод на количество от 15 до 19 зон. В случае с указанным типоразмером, так как зона с максимальной плотностью микроструктур (10 зона) делится на две части, при расположении источника света с двух сторон световода, необходимо рассчитать длину светового пути до начала зоны с максимальной плотностью микроструктур. Полученное значение через ширину рабочей области световода (H) выражается следующим образом:

$$L(0,5) = \frac{H}{2} - \frac{H}{2n_{зон}} = \frac{2Hn_{зон} - H}{4n_{зон}} = \frac{2H(n_{зон} - 1)}{4n_{зон}} = \frac{H(n_{зон} - 1)}{2n_{зон}}, \quad (5)$$

где $n_{зон}$ - количество зон световода.

Отсюда в общем случае для световодов с односторонним или двухсторонним расположением источников света:

$$L(0,5) = \frac{H(n_{зон} - 1)}{n_{ист} n_{зон}}, \quad (6)$$

где $n_{ист}$ - равен 1 при одностороннем расположении источника света (рисунок 2), равен 2 при двухстороннем расположении источника света (рисунок 3).

Отсюда $k2$ равен:

$$k2 = \left(\frac{H(n_{зон} - 1)}{2n_{зон}} \right)^{k1} / (k4 - k3). \quad (7)$$

Для проверки правильности выведенной формулы высчитывается коэффициент $k2$ с параметрами световода для типоразмера 9° x 7°:

$$k2 = \left(\frac{185(19-1)}{2 \cdot 19} \right)^{1,35} / (0,5 - 0,15) = 1198. \quad (8)$$

После подстановки формулы (7) в формулу (1) получаем следующее выражение:

$$z = \frac{L^{k1} (k4 - k3)}{\left(\frac{H(n_{зон} - 1)}{2n_{зон}} \right)^{k1}} + k3. \quad (9)$$

Коэффициент $k1$ является степенью полученной зависимости. Для его определения при проведении расчетов световодов различных типоразмеров построена зависимость $k1(L)$ (рисунок 6).

Из рассмотрения зависимости следует, что коэффициент $k1$ имеет линейную форму и может быть определен по следующей формуле:

$$k1 = 0,012L + 0,23. \quad (10)$$

Окончательно, после подстановки формулы (10) в (9):

$$z = \frac{L^{(0,012L + 0,23)} (k4 - k3)}{\left(\frac{H(n_{зон} - 1)}{2n_{зон}} \right)^{(0,012L + 0,23)}} + k3. \quad (11)$$

Коэффициент $k3$ является значением начальной плотности микроструктур (расположенных в непосредственной близости от источника света). Для его определения при проведении расчетов световодов различных типоразмеров построена зависимость $k3(H)$ (рисунок 7).

Коэффициент $k4$ является значением максимальной плотности микроструктур (удаленные на максимальное расстояние от источника света). Коэффициент $k4$ может быть выбран в диапазоне от 0,5 до 0,55.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ методики моделирования торцевого подсвета ЖК-дисплея,



Рис. 6. Зависимость $k1$ от светового пути световода

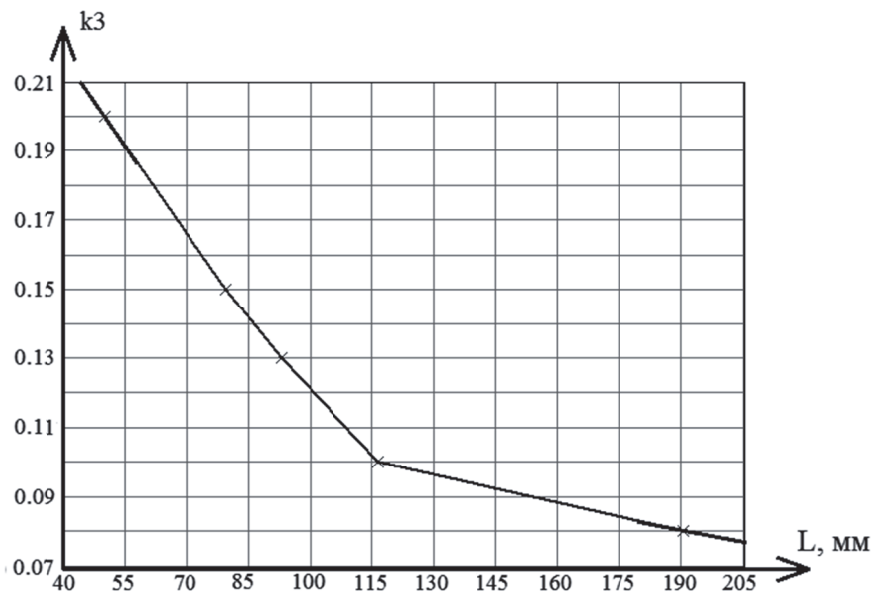


Рис. 7. Зависимость k_3 от рабочей области световода

выявлена наиболее трудоемкая операция при проведении светотехнического моделирования. Предложена математическая модель, позволяющая снизить трудоемкость моделирования за счет определения начального распределения микроструктур на плоскости световода в зависимости от типоразмера ЖК-дисплея.

Математическая модель и предложенный метод могут быть использованы светотехнических расчетах проектируемого торцевого подсвета ЖК-дисплея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харьков Д.В., Ефимов И.П. Математическая модель и метод построения модуля подсвета жидкокристаллических панелей на базе цветных светодиодов // Автоматизация процессов управления. 2017. № 3(49). С. 36-42
2. Харьков Д.В., Ефимов И.П., Д.Ш. Алимova Д.А. Цыганов Математическая модель и светотехниче-

ское моделирование модуля светодиодного подсвета // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т.20. № 4. С. 128-135

3. Шуберт Ф.Е. Светодиоды [пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича]. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
4. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
5. Kobayashi S., Mikoshiba S., Lim S. LCD Backlights // John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 279 с.
6. Дадонов В.А., Бондарь А.А. Анализ развития и современного состояния рынка светотехники // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание. 2014. № 5(29).
7. Kim Y.G., Oh T.S., Lee Y.M. Optimized pattern design of light-guide plate (LGP) // Optica Applicata, электронное научно-техническое издание. 2011. №4 (XLI).
8. Беляев В.В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // Жидкие кристаллы и их практическое использования. 2015. № 3(15). С. 7-27
9. Расчет оптических систем со светодиодами: учеб. Пособие / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Д. В. Нестеренко, А. Г. Налитое. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 80 с.

MATHEMATICAL MODEL AND LIGHTING SIMULATION OF THE END ILLUMINATION OF THE LIQUID CRYSTAL DISPLAY

© 2019 D.V. Kharkin, I.P. Efimov, D.Sh. Alimova

JSC "Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau"

The article deals with the questions of the lighting design of the end light of the liquid crystal display. The method of modeling the LED butt lights is considered. The developed mathematical models make it possible to reduce the laboriousness of the lighting calculation of the edge illumination. It is possible to calculate the parameters of the fiber at the initial stage of development.

Keywords: mathematical model, modeling, light source, fiber, microstructures, diffuser, end illumination.

Dmitry Kharkin, Graduate Student at the Department «Measuring and Computing Systems» UIGTU, Head of the Research Department of JSC «UKBP». E-mail: hardim@mail.ru
 Ivan Efimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department «Measuring and Computing Complexes» of UlSTU. E-mail: eip@ulstu.ru
 Dinara Alimova, Graduate Student at the Department «Measuring and Computing Complexes» of UlSTU, Head of the Integrated Thematic Team of the Research Department of JSC «UKBP». E-mail: dinalimova@icloud.com