

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

**Г. В. Симоненко**

**ВЛИЯНИЕ УГЛОВ ПРЕДНАКЛОНА МОЛЕКУЛ ЖК НА ОРИЕНТИРУЮЩИХ  
ПОДЛОЖКАХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ  
НА ОСНОВЕ  $\pi$ -ЯЧЕЕК**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,  
ул. Астраханская, 83, 410012 Саратов, Россия. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

*Выполнено компьютерное моделирование характеристик ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячеек для 3D-приложений при различных значениях углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях. Найдены граничные условия для  $\pi$ -ячеек с углом закрутки ЖК-структуры  $180^\circ$  и  $0^\circ$ , которые позволяют повысить значения оптических и динамических характеристик стандартных ЖК-затворов на  $\pi$ -ячейках. Показано, что нарушение антисимметричности граничных условий в  $\pi$ -ячейках приводит к существенному ухудшению характеристик ЖК-затвора.*

**Ключевые слова:** жидкие кристаллы, затворы, компьютерное моделирование.

**DOI:** 10.18083/LCApl.2018.3.26

**G. V. Simonenko**

**INFLUENCE OF PRE-TILT ANGLES OF LIQUID CRYSTALLINE MOLECULES PLACED  
ONTO ORIENTING SUBSTRATES ON CHARACTERISTICS OF LIQUID CRYSTALLINE  
MODULATORS BASED ON  $\pi$ -CELLS**

Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky,  
83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russia. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

*A computer simulation of characteristics of the LC shutter based on  $\pi$ -cells for 3D applications for various values of the pre-tilt angles of LC molecules placed onto orienting surfaces was performed. The boundary conditions for  $\pi$ -cells with twist angles of the LC structure equal to  $180^\circ$  or  $0^\circ$  were found, which allow to increase the optical and dynamic characteristics of the standart LC shutters on  $\pi$ -cells. It is shown that the violation of the antisymmetry of the boundary conditions in  $\pi$ -cells leads to a significant deterioration of the LC shutter characteristics.*

**Key words:** liquid crystals, shutter, computer modeling.

## Введение

В настоящее время жидкокристаллические (ЖК) панели нашли свое применение как в области устройств отображения информации (ЖК-мониторы) [1–3], так и в области устройств преобразования (например, стереочки для 3D-приложений) [1, 5]. Если для дисплейных приложений наибольшее распространение получили TN (*twist nematic*)-, IPS (*In-Plane Switching*)- и MVA (*Multi-Domain Vertical Alignment*)-матрицы [1, 6, 7], то для применения в качестве модуляторов светового излучения чаще используются панели на основе  $\pi$ -ячеек [5]. При этом TN-ячейки (или *twist*-ячейки) также используются в 3D-приложениях, но имеют несколько худшие динамические характеристики. Так как в последнее время очень большое внимание уделяется 3D-приложениям [5, 8–16], то мы остановимся на ЖК-затворах, применяемых для этих целей. Одним из самых распространенных ЖК-устройств модуляции оптического излучения для 3D-приложений является ЖК-затвор, состоящий из одной или двух одинаковых  $\pi$ -ячеек с взаимно перпендикулярным расположением молекул ЖК на смежных поверхностях и помещенных между двумя скрещенными поляризаторами [5]. Такая конструкция позволяет получить за счет управления равные времена реакции и релаксации, величина которых определяется только временами реакции составляющих устройство ячеек. В этом случае используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в планарных или закрученных структурах ЖК в ячейках с антисимметричной ориентацией молекул ЖК на граничных поверхностях [10–15]. Менее распространенными являются ЖК-затворы, выполненные на стандартных TN-ячейках. Основным недостатком всех конструкций таких устройств является относительно большое время срабатывания ( $\approx 4$  мс), что ограничивает использование этих затворов в более быстродействующих модуляторах. Поэтому до сих пор актуальной задачей является поиск конструкции ЖК-затвора, которая имела бы быстродействие в субмиллисекундном диапазоне. Хотя в настоящее время известно несколько таких конструкций [16–18], однако в промышленном масштабе они не получили распространения. Ранее нами был выполнен ряд исследований, позволяющих найти

оптимальную конструкцию подобных ЖК-затворов [12, 13, 19]. Однако в предыдущих публикациях рассматривались  $\pi$ -ячейки, выполненные по стандартной технологии ориентации ЖК на поверхности с использованием натирания. В этом случае величина угла преднаклона молекул ЖК на первой ориентирующей подложке равна  $2^\circ$ , а на второй – минус  $2^\circ$ . Однако в настоящее время для ориентации ЖК используется технология фотоориентации, которая позволяет обеспечивать различные значения углов преднаклона молекул ЖК на поверхности ячейки [20–22]. В силу этого актуальным является вопрос о влиянии величины угла преднаклона молекул ЖК в  $\pi$ -ячейке на характеристики ЖК-затвора, выполненного на ее основе. С этой целью нами выполнено компьютерное моделирование характеристик ЖК-затвора для 3D-приложений при различных углах преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях и выяснены основные факторы, ограничивающие максимально достижимые значения контраста, пропускания, ахроматичности изображения и быстродействие этих устройств. Ниже приведены результаты теоретического исследования оптических и динамических характеристик различных ЖК-устройств, которые основаны на эффекте интерференции поляризованных лучей управляемой электрическим полем в закрученных и незакрученных планарных структурах ЖК в  $\pi$ -ячейках.

## Характеристики ЖК-устройств

Известно [23–25], что для достаточно полного описания характеристик ЖК-устройств отображения (или преобразования) информации необходимо определить целый ряд их характеристик: оптические (пропускание и контраст для различных длин волн видимого спектра  $\lambda$ , угловые зависимости контраста и пропускания, цветовые координаты); электрооптические (вольт-контрастная характеристика, степень мультиплексирования); динамические (времена реакции  $\tau_{reac}$  и релаксации  $\tau_{relax}$ ). Тем не менее для адекватного описания характеристик ЖК-устройства с целью выбора оптимальной конструкции достаточно использовать следующий набор интегральных характеристик [19, 26]:

- среднее по спектру пропускание (отражение) ЖК-устройства;

- ахроматичность изображения;
- средний по спектру контраст изображения;
- полное время срабатывания ЖК-устройства.

ЖК-затвор характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний: «выключено» – управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового; «включено» – управляющее напряжение на затвор подано выше порогового значения. Между этими двумя состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. В этом случае среднее по спектру пропускание устройства  $T_{off}$  для состояния «выключено» («включено»  $T_{on}$ ) определяется следующим образом:

$$T_{off} = \frac{\int_{400}^{800} T_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad T_{on} = \frac{\int_{400}^{800} T_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda},$$

где  $T_{off(on)\lambda}$  – пропускание устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны  $\lambda$ ;  $I_{\lambda}$  – спектральное распределение источника излучения  $D_{65}$  (или какого-либо другого источника излучения);  $K_{\lambda}$  – спектральная чувствительность глаза.

Тогда средний по спектру контраст изображения  $C$  вычисляется так:

$$C = \frac{T_{off}}{T_{on}}.$$

Координаты цвета ( $x$ ,  $y$ ) определяются с помощью известных выражений [27]:

$$x = \frac{\int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{G}, \quad y = \frac{\int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{G},$$

$$G = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{z}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda,$$

где  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – кривые смешения трех основных цветов в цветовой системе координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Ахроматичность изображения  $H$  определяется как расстояние текущей точки изображения с координатами цвета ( $x$ ,  $y$ ) от точки белого цвета  $D_{65}$  с координатами ( $x_{65}$ ,  $y_{65}$ ) [26, 27]:

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}.$$

Для описания динамики переключения ЖК-затвора из одного состояния в другое и обратно используется понятие полного времени

срабатывания устройства (или быстродействие)  $\tau$ , которое в данном случае определяется так [25]:

$$\tau = \tau_{reac} + \tau_{relax}.$$

При этом под временем реакции  $\tau_{reac}$  ЖК-устройства (релаксации  $\tau_{relax}$ ) понимается время, которое необходимо для того, чтобы устройство изменило свое пропускание от значения  $T_{off}$  ( $T_{on}$ ) до значения  $T_{on}$  ( $T_{off}$ ) при переключении управляющего напряжения от  $U_{off}$  ( $U_{on}$ ) до  $U_{on}$  ( $U_{off}$ ).

### Метод исследования характеристик ЖК-устройства обработки информации

В связи со сложностью натурального моделирования для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-устройства чаще всего применяется метод компьютерного моделирования [23, 24]. Нами для этой цели использовался пакет программ *MOUSE-LCD* [28, 29, 30], который предназначен для моделирования электрооптических, оптических и эргономических характеристик различных электрооптических эффектов в произвольных ЖК-структурах.

Первоначальная версия пакета программ («Лектрооптика-М») была разработана для универсальных ЭВМ серии ЕС в конце 80-х годов [29]. Несколько позже была реализована версия комплекса программ для персональных компьютеров для операционной системы *MS DOS* версии 3.0 [30]. При реализации этих программных комплексов использован принцип блочного построения, согласно которому для решения самостоятельной задачи используется программный блок, оформленный в виде отдельного исполняемого модуля или отдельного объектного модуля. Связь между отдельными программными модулями осуществляется только через файлы данных.

Отдельные программные модули могут быть использованы самостоятельно от других модулей для решения самостоятельных. Пакет программ выполняет пошаговое моделирование характеристик ЖК-устройства в следующей последовательности:

- расчет статического поля конфигурации ЖК-директора в электрическом поле (методика решения задачи описана в работах [31, 32]);
- расчет статического оптического отклика ЖК-устройства на управляющее электрическое напряжение (методика решения задачи описана в [33, 34]);

– расчет динамики переориентации ЖК-директора при переключении управляющего электрического напряжения (методика решения задачи описана в работе [35]);

– расчет времен реакции и релаксации оптического отклика ЖК-устройства при переключении рабочего напряжения (методика решения задачи описана в работах [31, 32]).

Сравнение экспериментальных и расчетных данных для ЖК-устройства на *twist*-эффекте и на эффекте «гость-хозяин» показало, что величина расхождения экспериментальных и расчетных оптических характеристик  $\Sigma$  для указанных типов ЖК-устройства находится в пределах погрешности эксперимента. Если угол падения света на устройство изменяется от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , то для ЖК-устройства на *twist*-эффекте  $\Sigma \leq 10\%$ , а для ЖК-устройства на эффекте «гость-хозяин»  $\Sigma \leq 6\%$ .

### Результаты и обсуждение

Как известно [12, 19], существует большое число конструктивно-технологических и физических параметров ЖК-затвора, которые определяют его оптические характеристики. В качестве эффекта, на основе которого работает ЖК-затвор, нами выбрано явление управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в планарных структурах с различным углом закрутки. В данной работе рассмотрено влияние значений углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках на оптические и динамические характеристики ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячеек.

При моделировании электрооптических характеристик ЖК-затвора использовались данные для ЖК-вещества типа ZLI 4792 фирмы Merck, Германия ( $K_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\epsilon_{\perp} = 4,88$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 13,54$ ,  $\Delta n$  (436 нм) = 0,104,  $\Delta n$  (546 нм) = 0,1,  $\Delta n$  (633 нм) = 0,096). В случае использования в затворе ЖК с большой оптической анизотропией в качестве модельного вещества выбирался материал E7 фирмы Merck с  $\Delta n$  (550 нм) = 0,223. Во всех расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. В качестве поляризатора использовалась пленка NPF – F 1205 DU. Угол ориентации входного поляризатора составлял  $45^\circ$  с направлением натирания на первой подложке ЖК-ячейки, а для выходного поляризатора угол

ориентации равнялся  $-45^\circ$  с тем же направлением. При моделировании значения остальных конструктивных параметров ЖК-затвора считались равными средним технологическим величинам [36]. Нами рассматривались две конструкции  $\pi$ -ячеек: «классическая» с углом закрутки ЖК-структуры  $0^\circ$  [37] и модернизированная с углом закрутки  $\Phi_T = 180^\circ$  [38]. С целью исключения влияния значения управляющего напряжения на характеристики ЖК-затвора были выбраны одинаковыми для всех углов закрутки структур ЖК, при этом  $U_{off} = 0$  В, а  $U_{on} = 12$  В. То есть  $U_{off} < U_{Fred}$ ,  $U_{on} \gg U_{Fred}$ , где  $U_{Fred}$  – напряжение порога эффекта Фредерикса в структуре ЖК.

### Оптические характеристики ЖК-затвора на основе структуры с углом закрутки $0^\circ$

Для начала выясним влияние значения угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующей поверхности при антисимметричных граничных условиях ( $\theta_{01} = -\theta_{02}$ ;  $\theta_{01}$  ( $\theta_{02}$ ) – угол преднаклона молекул на первой (второй) ориентирующей подложке) на оптические характеристики «классической»  $\pi$ -ячейки. Сразу стоит заметить, что изменение угла преднаклона  $\theta_{01}$  в пределах от  $1^\circ$  до  $12^\circ$  не сказывается на значениях среднего по спектру пропускания устройства в состоянии «выключено»  $T_{off}$  и ахроматичности. При этом  $0,39 \leq T_{off} \leq 0,4$ , а  $H \leq 0,05$ , что соответствует условиям, предъявляемым к полноцветным устройствам отображения информации [26]. Вместе с этим зависимость среднего по спектру контраста  $C$  ЖК-модулятора от угла преднаклона имеет вид кривой с максимумом (см. рис. 1), что говорит о наличии оптимальных условий ориентации молекул ЖК на подложках. Дальнейшее увеличение значения угла преднаклона  $\theta_{01}$  приводит к резкому ухудшению оптических характеристик ( $C$ ,  $T_{off}$  и  $H$ ). Величина угла преднаклона  $\theta_{01}^{opt}$ , соответствующая максимальным значениям  $C$ ,  $T_{off}$  и минимальному значению  $H$ , зависит от анизотропии показателей преломления ЖК. Так,  $\theta_{01}^{opt} = 8^\circ$  для  $\Delta n = 0,2$ , а для  $\Delta n = 0,1$   $\theta_{01}^{opt} = 10^\circ$ . Таким образом, для того чтобы улучшить оптические характеристики ЖК-затвора на основе «классической»  $\pi$ -ячейки, необходимо использовать ЖК-вещество с малой анизотропией и углами преднаклона молекул ЖК на подложках, равными  $10^\circ$ .

Далее выясним вопрос о влиянии отклонения углов ориентации молекул ЖК от антисимметричного условия  $\theta_{01} = -\theta_{02}$ . Этот вопрос важен для технологии ориентации ЖК, так как всегда существует некоторый разброс в значениях этих углов. При этом стоит подчеркнуть, что разброс углов ориентации не превышает  $1^\circ$ , поэтому мы рассмотрим случай, когда  $\theta_{01} = 2^\circ$ , а  $1^\circ \leq -\theta_{02} \leq 2^\circ$ . Отметим, что как и в случае выполнения условий антисимметричности углов преднаклона на подложках,  $T_{off} \leq (0,395 \pm 0,05)$ , а  $H \leq 0,05$ . С другой стороны, средний по

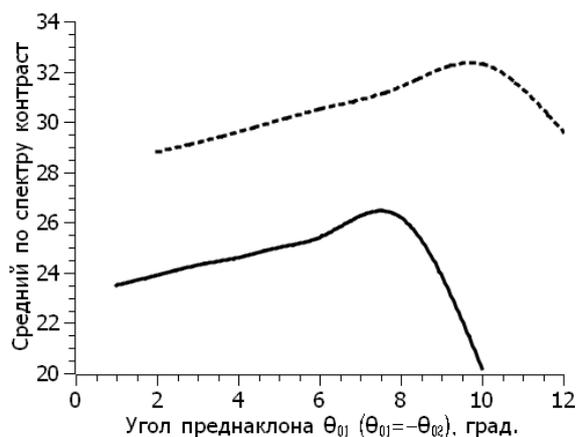


Рис. 1. Зависимость среднего по спектру контраста от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках для структуры с  $\Phi_T = 0^\circ$  при антисимметричных углах преднаклона. Сплошная линия –  $\Delta n = 0,1$ ; пунктирная линия –  $\Delta n = 0,2$

Fig. 1. Dependence of the average contrast spectrum on the pretilt angle of LC molecules on orienting substrates for a structure with  $\Phi_T = 0^\circ$  at antisymmetric pretilt angles. The solid line is  $\Delta n = 0,1$ ; dotted line  $\Delta n = 0,2$

#### Оптические характеристики ЖК-затвора на основе структуры с углом закрутки $180^\circ$

На рисунке 3 представлены зависимости среднего по спектру контраста  $S$  и ахроматичности  $H$  ЖК-затвора от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях для антисимметричных граничных условий ( $\theta_{01} = -\theta_{02}$ ). В отличие от случая модулятора на основе «классической»  $\pi$ -ячейки зависимость  $S = S(\theta_{01})$  носит монотонный характер, и эта зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией. При этом максимальное значение контраста ЖК-затвора достигается при минимальном значении

спектру контраст изображения такого несимметричного ЖК-затвора может быть существенно больше, чем контраст «классического» модулятора при антисимметричных граничных условиях (см. рис. 2). Следовательно, для того чтобы улучшить оптические характеристики ЖК-затвора на основе «классической»  $\pi$ -ячейки, необходимо использовать ЖК-вещество с малой анизотропией и применять ЖК-ячейки с несимметричными граничными условиями на подложках, то есть  $\theta_{01} = 2^\circ$  и  $\theta_{02} = -1^\circ$ .

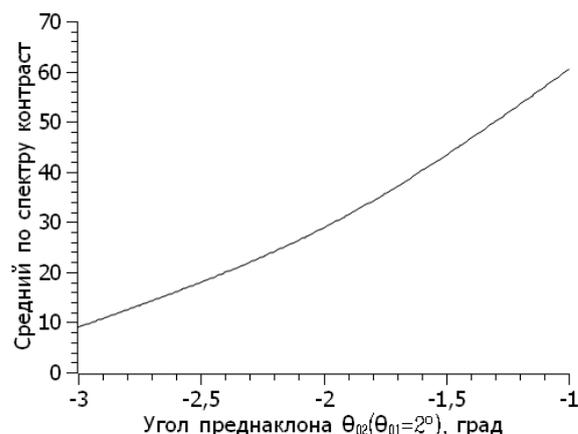


Рис. 2. Зависимость среднего по спектру контраста от угла преднаклона молекул ЖК на второй ориентирующей подложке для структуры с  $\Phi_T = 0^\circ$  при  $\theta_{01} = 2^\circ$

Fig. 2. Dependence of the average in the contrast spectrum on the pretilt angle of the LC molecules on the second orienting substrate for the structure with  $\Phi_T = 0^\circ$  at  $\theta_{01} = 2^\circ$

угла преднаклона на ориентирующей подложке  $\theta_{01} = 1^\circ$  ( $\theta_{02} = -1^\circ$ ). Одновременно с этим зависимость  $H = H(\theta_{01})$  имеет более сложную форму, которая зависит от величины оптической анизотропии ЖК. Вместе с тем минимальное значение ахроматичности также достигается для  $\theta_{01} = 1^\circ$  ( $\theta_{02} = -1^\circ$ ), а условие ахроматичности для полноцветного устройства ( $H \leq 0,05$ ) не выполняется. Стоит отметить, что значение среднего по спектру пропускания устройства для состояния «выключено»  $T_{off}$  не зависит от изменения величины угла преднаклона на ориентирующих поверхностях

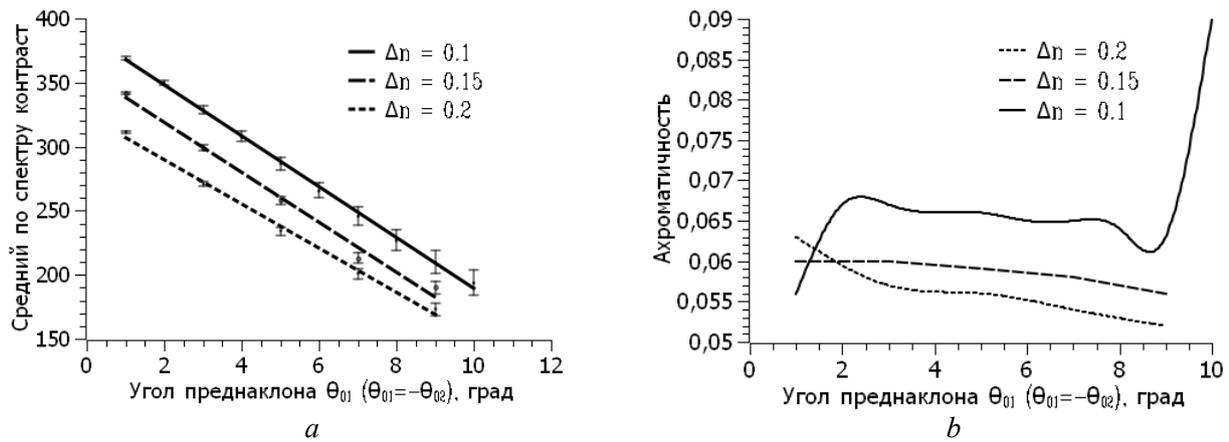


Рис. 3. Зависимость среднего по спектру контраста (a) и ахроматичности (b) от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках для структуры с  $\Phi_T = 180^\circ$  при антисимметричных углах преднаклона

Fig. 3. Dependence of the average on the contrast spectrum (a) and the achromaticity (b) on the angle of prediction of LC molecules on orienting substrates for a structure with  $\Phi_T = 180^\circ$  at antisymmetric pretilt angles

ячейки ( $T_{off} \approx 0,385$ ). Из представленных результатов моделирования следует, что наилучшие оптические характеристики (максимальный контраст и минимальное значение ахроматичности) имеет затвор, выполненный на основе ЖК с  $\Delta n = 0,1$  и углами преднаклона  $\theta_{01} = 1^\circ$  и  $\theta_{02} = -1^\circ$ . С другой стороны, для получения оптимальных значений оптических характеристик ЖК-затвора необходимо, чтобы  $\Delta n \cdot d \approx 0,6$  мкм ( $d$  – толщина слоя ЖК в ячейке). Поэтому при меньших значениях оптической анизотропии ЖК необходимо увеличивать толщину ЖК-слоя, что приводит к существенному увеличению полного времени срабатывания устройства. Таким образом, стоит искать компромисс между оптическими и динамическими характеристиками ЖК-затвора, но в любом случае создание антисимметричных граничных условий с минимальным значением угла преднаклона  $\theta_{01} = 1^\circ$  и  $\theta_{02} = -1^\circ$  дает по сравнению со стандартными граничными условиями  $\theta_{01} = 2^\circ$  и  $\theta_{02} = -2^\circ$  выигрыш до 10 % по контрасту и ахроматичности изображения.

Отклонение от условия антисимметричности преднаклона углов на ориентирующих поверхностях в ЖК-ячейке с углом закрутки структуры  $\Phi_T = 180^\circ$  в пределах  $\pm 1^\circ$  существенным образом снижает контраст ЖК-затвора (рис. 4), но не оказывает никакого влияния на значения пропускания в состоянии «выключено» и ахроматичности. Таким образом, данная конструкция

ЖК-затвора является весьма критичной к нарушению антисимметричности граничных условий, что отличает этот модулятор от «классического» варианта  $\pi$ -ячейки.

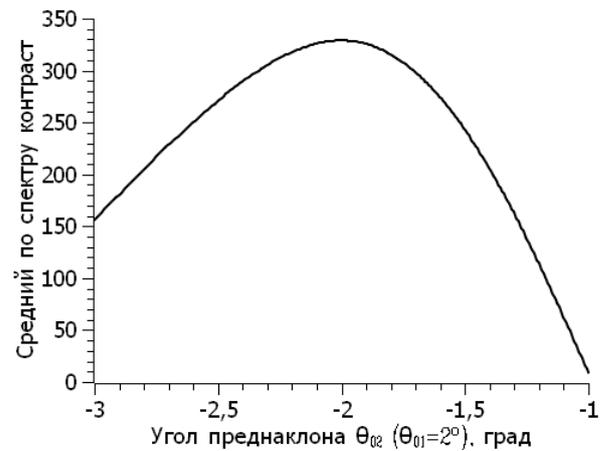


Рис. 4. Зависимость среднего по спектру контраста от угла преднаклона молекул ЖК на второй ориентирующей подложке для структуры с  $\Phi_T = 180^\circ$  при  $\theta_{01} = 2^\circ$

Fig. 4. Dependence of the average in the contrast spectrum on the pretilt angle of the LC molecules on the second orienting substrate for a structure with  $\Phi_T = 180^\circ$  at  $\theta_{01} = 2^\circ$

#### Динамические характеристики ЖК-затвора

Для понимания вопроса о малости полного времени срабатывания ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячеек, рассмотрим вид распределения углов

ориентации директора ЖК ( $\theta, \varphi$ ) по толщине слоя ячейки при различных управляющих напряжениях (рис. 5). Как следует из этого рисунка, центральная часть ( $z/d = 0,5$ ) распределения углов ориентации ЖК остается постоянной при любых управляющих напряжениях. Это означает, что течение, которое возникает внутри  $\pi$ -ячейки при изменении управляющего напряжения, можно разделить на два независимых и не связанных друг с другом течения (условно в верхней и нижней равных частях ячейки). При этом динамика переключения из одного состояния в другое будет определяться не полной толщиной ЖК-ячейки, а только половиной этой толщины. Согласно известной аналитической зависимости [23, 24]  $\tau_{reac}$  и  $\tau_{relax}$  растут по закону квадратов в зависимости от толщины ЖК:

$$\tau_{reac}, \tau_{relax} \propto Gd^2,$$

где  $G$  – постоянная, которая для заданной величины управляющего напряжения зависит только от физических постоянных ЖК-вещества.

Использование антисимметричных граничных условий в  $\pi$ -ячейке приводит к тому, что в динамике переключения играет роль только половина толщины рабочего зазора, поэтому полное время срабатывания такого устройства меньше, чем у аналогичных ячеек такой же толщины, но при симметричных граничных условиях. В силу этого нарушение антисимметричности граничных условий должно ухудшать быстродействие ЖК-ячеек.

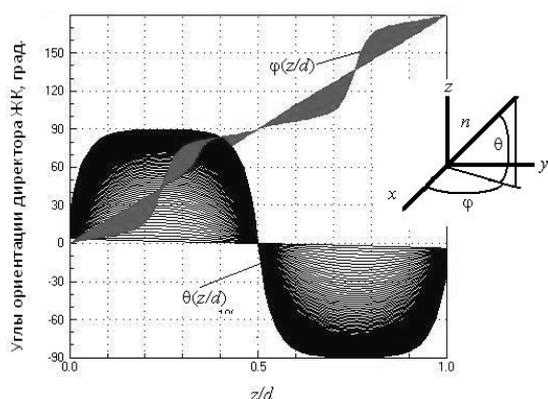


Рис. 5. Пример распределения углов ориентации директора ЖК ( $\theta, \varphi$ ) по толщине слоя при различных управляющих напряжениях

Fig. 5. An example of the distribution of the orientation angles of the LC director ( $\theta, \varphi$ ) over the layer thickness at different control voltages

Влияние физических параметров ЖК-вещества на время отклика затвора хорошо описывается известными аналитическими соотношениями [23, 24]

$$\tau_{reac} \propto \gamma / \Delta \epsilon, \tau_{relax} \propto \gamma / k,$$

где  $\gamma$  – коэффициент вязкости,  $k$  – средний коэффициент упругости ЖК-вещества. Поэтому для получения малых времен оптического отклика необходимо иметь ЖК-вещество с малой вязкостью и большим значением диэлектрической анизотропии и коэффициентов упругости.

Основными конструктивными параметрами, которые существенным образом влияют на полное время срабатывания ЖК-затвора ( $\tau$ ), являются следующие: управляющие напряжения  $U_{off}$  и  $U_{on}$ , толщина ЖК-зазора в ячейке  $d$  и угол закрутки структуры ЖК  $\Phi_T$  [23–25]. ЖК-затвор, как правило, работает при значениях  $U_{off}$  ниже порога Фредерикса, а величина  $U_{on}$  достигает десятков пороговых значений Фредерикса. Как было показано ранее [38, 39] времена переключения между состояниями «выключено» и «включено» и в этом случае хорошо описываются известными аналитическими выражениями:

$$\tau_{reac} \propto \frac{1}{(U_{on}^2 - U_{off}^2)}, \tau_{relax} \propto (U_{on} - U_{off})^\alpha,$$

где значение коэффициента  $\alpha$  определяется физическими постоянными ЖК-вещества. Поэтому, если значения управляющих напряжений одинаковы для различных ЖК-структур, то время быстрогодействия должно зависеть только физических и конструктивных параметров ЖК-затвора. Следовательно, если использовать в различных конструкциях затвора одно и то же ЖК-вещество, то быстродействие этих устройств должно определяться только толщиной ЖК-слоя  $d$  и его углом закрутки структуры ЖК  $\Phi_T$ . Ранее было показано, что при фиксации значений управляющих напряжений угол закрутки ЖК-структуры слабо влияет на быстродействие ЖК-затвора на основе планарных ячеек [19]. Поэтому остается открытым только вопрос о влиянии на полное время срабатывания углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ячейки.

На рисунке 6 представлена зависимость нормированного полного времени срабатывания ЖК-затвора  $\tau^H$  от величины угла преднаклона молекул на ориентирующих поверхностях  $\theta_{01}$  при антисимметричных граничных условиях

( $\theta_{02} = -\theta_{01}$ ). При вычислении  $\tau^H$  за единицу принималось полное время срабатывания затвора для  $\theta_{01} = 1^\circ$  ( $\theta_{02} = -1^\circ$ ) и  $\Phi_T = 180^\circ$ , а для  $\Phi_T = 0^\circ$  за единицу принималось полное время срабатывания затвора для  $\theta_{01} = 2^\circ$  ( $\theta_{02} = -2^\circ$ ). Как следует из этого рисунка, для обоих углов закрутки ЖК-структуры зависимость  $\tau^H = \tau(\theta_{01})$  имеет линейно растущий характер, однако этот рост незначительный. Для  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 0^\circ$  этот рост не превышает 2 %, а для  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 180^\circ$  – 5 %. Этот вывод верен как для ЖК-вещества с малым  $\Delta n$ , так и для ЖК с большим значением  $\Delta n$ . Нарушение условия антисимметричности углов преднаклона на ориентирующих поверхностях в  $\pi$ -ячейке с  $\Phi_T = 0^\circ$  и  $180^\circ$  в пределах  $\pm 1^\circ$  не приводит к существенному изменению нормированного полного времени срабатывания устройства (изменения не превышают 4 %).

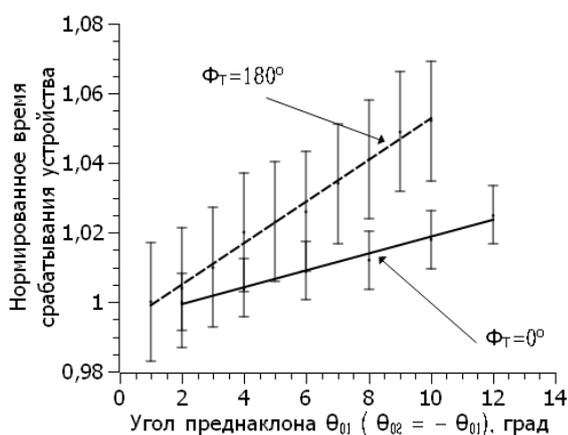


Рис. 6. Зависимость нормированного времени срабатывания устройства от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках при антисимметричных углах преднаклона

Fig. 6. Dependence of the normalized response time of the device on the pretilt angle of LC molecules on orienting substrates at antisymmetric pre-tilt angles

Таким образом, суммируя результаты, представленные выше, можно сказать, что с точки зрения оптических и динамических характеристик оптимальной конструкцией ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 180^\circ$  является ячейка с антисимметричными граничными условиями при  $\theta_{01} = 1^\circ$  ( $\theta_{02} = -1^\circ$ ). Если рассматривать ЖК-модулятор на основе  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 0^\circ$ , то опти-

мальными характеристиками обладает ячейка с несимметричными граничными условиями:  $\theta_{01} = 2^\circ$  и  $\theta_{02} = -1^\circ$ .

## Заключение

Нами выполнено компьютерное моделирование характеристик ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячеек для 3D-приложений при различных значениях углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях и найдены граничные условия, при которых достигаются максимальные значения контраста изображения, а также минимальные значения ахроматичности и полного времени срабатывания устройства. На основе этого исследования можно сделать следующие практические выводы:

- для ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячейки с нулевым углом закрутки ЖК-структуры существует оптимальное значение угла преднаклона молекул ЖК, обеспечивающее максимальный контраст и минимальную величину ахроматичности изображения. Величина этого угла зависит от значения  $\Delta n$  ЖК и при меньшей величине оптической анизотропии величина угла преднаклона, при которой максимален контраст изображения и минимальна его ахроматичность, больше. Для ЖК-модулятора на основе  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 0^\circ$  оптимальными оптическими и динамическими характеристиками обладает ячейка с несимметричными граничными условиями:  $\theta_{01} = 2^\circ$  и  $\theta_{02} = -1^\circ$ ;

- для ЖК-затвора на основе  $\pi$ -ячейки с углом закрутки ЖК-структуры  $180^\circ$  максимальный контраст изображения и его минимальная ахроматичность достигаются при минимально возможном значении угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках, то есть при  $\theta_{01} = 1^\circ$  ( $\theta_{02} = -1^\circ$ ). При этом контраст изображения линейно падает при увеличении значения  $\theta_{01}$  для любого значения оптической анизотропии ЖК. Минимальное отклонение ( $\pm 1^\circ$ ) условий ориентации от антисимметричных приводит к резкому ухудшению оптических характеристик устройства;

- увеличение угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях при антисимметричных граничных условиях приводит к

незначительному росту полного времени срабатывания этого устройства как для  $\pi$ -ячеек с нулевым углом закрутки ЖК-структуры, так и с  $\Phi_T = 180^\circ$ . При этом полное время срабатывания ЖК-затвора линейно зависит от  $\theta_{01}$  ( $\theta_{02} = -\theta_{01}$ ).

#### Список литературы / References

1. Беляев В. В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 7–27. [Belyaev V. V. Promising applications and technologies of liquid crystal displays and photonics devices. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 7–27 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7].
2. Матешев И., Туркин А. Обзор современных технологий производства ЖК-матриц // *Современная электроника*. 2014. № 8. С. 16–19. [Mateshev I., Turkin A. Review of modern technologies for the production of LCD matrices. *Modern electronics*, 2014, 8, 16–19 (in Russ.).]
3. Туркин А. ЖК-панели Sharp для промышленного применения: основные особенности и обзор продукции // *Компоненты и технологии*. 2012. № 3. С. 80–82. [Turkin A. Sharp LCD panels for industrial applications: key features and product overview. *Components and technologies*, 2012, 3, 80–82. (in Russ.).]
4. Матешев И., Туркин А. Обзор новых ЖК-панелей Sharp для промышленного применения // *Современная электроника*. 2014. № 5. С. 22–25. [Mateshev I., Turkin A. Overview of Sharp's new LCD panels for industrial applications. *Modern electronics*, 2014, 5, 22–25 (in Russ.).]
5. Самарин А. Лучшие дисплейные продукты 2008 года // *Компоненты и технологии* 2008. № 8. С. 10–13. [Samarin A. The best display products of 2008. *Components and technologies*, 2008, 8, 10–13. (in Russ.).]
6. Пахомов С. Современные ЖК-мониторы // *КомпьютерПресс*. 2004. № 12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688>. [Pakhomov S. Modern LCD monitors. Available at: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688> (in Russ.).]
7. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/>. [Vyalkov D. Compare the types of LCD matrices (LCD-, TFT-) monitors. Available at: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/> (in Russ.).]
8. Woods A.J. Crosstalk in stereoscopic displays: a Review. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, **21** (4), 040902.
9. Патент России № RU 2490818. Авто-стереоскопический дисплей с полноэкранным 3d разрешением (варианты) и способ управления активным параллаксным барьером дисплея / Ежов В. А., опублик. 2012. [Russian patent № RU 2490818. Auto-stereoscopic display with full-screen 3d resolution (options) and a way to control the active parallax display barrier / Ezhov V.A., publ. 2012. Right holders: Ezhov V.A. (in Russ.).]
10. Патент РФ № 2604110. Наблюдательно-регистрирующее устройство с локально-адаптивной оптической защитой / Ежов В. А. опублик. 10.12.2016. [Russian patent № 2604110. Observation-recording device with locally adaptive optical protection / Ezhov V.A., publ. 10.12.2016. Right holders: Ezhov V.A. (in Russ.).]
11. Патент России № RU 2488150. Мультистандартные жидкокристаллические стереочки / Студенцов С. А., Ежов В. А., опублик. 2011. [Russian patent № RU 2488150. Multi-standard liquid crystal glasses / Studentsov S.A., Ezhov V.A., publ. 2011. Right holders: Studentsov S.A., Ezhov V.A. (in Russ.).]
12. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Выбор оптимальной конструкции оптического затвора на  $\pi$ -ячейке // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80, № 9. С. 18–22. DOI: 10.1364/JOT.80.000537. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Ezhov V.A. Choosing the optimum design for an optical shutter based on a  $\pi$ -cell. *Journal of Optical Technology*, 2013, **80** (9), 537–541].
13. Симоненко Г. В. Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81, № 10. С. 50–55. DOI: 10.1364/JOT.81.000594. [Simonenko G.V. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs. *Journal of Optical Technology*, 2014, **81** (10), 594–598].
14. Deng-Ke, Wu Y.S.T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester: John Wiley & Sons, 2014, 592 p.
15. Hsien Hui Cheng, Achintya Bhowmik, Philip J. Bos. Fast-response liquid crystal variable optical retarder and multilevel attenuator. *Optical Engineering*, 2013, **52** (10), 105–107.
16. Komitov L., Hegde G., Kolev D. Fast liquid crystal light shutter. *Journal of physics d: Applied physics*, 2011, **44** (2), 442002–442006.
17. Geis M.W., Molnar R.J., Turner G. W., Lyszczarz T.M. 30 to 50 ns Liquid-Crystal Optical Switches. *Emerging Liquid Crystal Technologies V* / ed. by Liang-Chy Chien. *Proc. of SPIE*, 2010, **7618**, 76180J-1–76180J-5. DOI: 10.1117/12.840281.

18. Mohammadimasoudi M., Shin J., Lee K., Neyts K., Beeckman J. Microsecond-range optical shutter for unpolarized light with chiral nematic liquid crystal. *AIP ADVANCES*, 2015, **5**, 047122–047125.
19. Симоненко Г. В. Оптические характеристики жидкокристаллических модуляторов на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных планарных структурах малой толщины // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85, № 1, С. 3–11. DOI: 10.1364/JOT.85.000001. [Simonenko G.V. Optical characteristics of liquid-crystal modulators based on electric-field-controlled birefringence in various low-thickness planar structures. *Journal of Optical Technology*, 2018, **85** (1), 1–7].
20. Chigrinov V., Kozenkov V., Kwok H.S. Photoalignment of liquid crystalline materials. John Wiley & Sons, Ltd., 2008, 232 p.
21. Yaroshuk O., Reznikov Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**, 286–300.
22. Chrzanowski M., Zieliński J., Olifierczuk M., Kędzierski J., Nowinowski-Kruszelnicki E. Photoalignment – an alternative aligning technique for Liquid Crystal Displays. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2011, **48** (1), 7–13.
23. Сухарьер А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukharier A.S. Liquid crystal indicators. Moscow : Radio i svyaz, 1991, 256 p. (in Russ.)].
24. Chigrinov V.G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London : Artech House, 1999, 359 p.
25. Симоненко Г., Тучин В., Зимняков Д. Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010, 216 с. [Simonenko G., Tuchin V., Zimnyakov D. Optical characteristics of liquid crystal and biological media. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010, 216 p.
26. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Ахроматичность ЖК-модулятора для 3D-приложений // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 82–90. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Ezhov V.A. Achromaticity of the LCD modulator for 3D applications. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2015, **15** (3), 82–90 (in Russ.) DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.82].
27. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники : учебник для вузов. М. : Изд-во МГУП, 2002. 280 с. [Shashlov A.B., Uvarova R.M., Churkin A.V. Basics of lighting: Textbook for high schools. Moscow : MGUP Publisher, 2002, 280 p. (in Russ.)].
28. Yakovlev D.A., Simonenko G.V., Tsoy V.I., Chigrinov V.G., Khokhlov N.A., Pdyachev Yu.B. LCD-design: universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal. *Saratov Fall Meeting 2001: Coherent Optics of Ordered and Random Media II. Proc. SPIE*, 2002, **4705**, 255–263. DOI:10.1117/12.469020.
29. Чигринов В. Г., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А., Цой В. И., Хохлов Н. А., Подьячев Ю. Б. Универсальный комплекс ЭВМ программ для оптимизации проектирования жидкокристаллических дисплеев // *Информат. Серия: Средства отображения информации ВНИИ межотрасл. инф.* 1993. № 2. С. 90–94. [Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Khokholov N.A., Podyachev Yu.B. Universal computer complex programs for optimizing the design of liquid crystal displays. *Informat. Ser. Sredstva otobrazheniya informatsii VNIi mezhotrasl. inf.*, 1993, 2, 90–94 (in Russ.)].
30. Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Podjachev Yu.B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2000, **351**, 17–25.
31. Симоненко Г. В., Цой В. И., Яковлев Д. А. Метод вычисления углов ориентации оптической оси жидкого кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле // *Компьютерная оптика*. 2001. № 21, С. 88–99. [Simonenko G.V., Tsoy V.I., Yakovlev D.A. Method for calculating the angles of orientation of the optical axis of a liquid crystal in an external electric field. *Computer optics*, 2001, 21, 88–99 (in Russ.)].
32. Миронов А. А., Симоненко Г. В. Оптический отклик твист-индикатора при двумерной упругой деформации жидкого кристалла, вызванной электрическим полем, в зависимости от физических и конструктивных параметров устройства // *Компьютерная оптика*. 2006. № 30. С. 74–80. [Mironov A.A., Simonenko G.V. The optical response of a twist indicator in the case of a two-dimensional elastic deformation of a liquid crystal caused by an electric field, depending on the physical and structural parameters of the device. *Computer optics*, 2006, 30, 74–80 (in Russ.)].
33. Цой В. И. Методика расчета оптических свойств жидкокристаллических индикаторов, работающих на основе двулучепреломления закрученных структур // *Тезисы докладов 5-й конференции социалистических стран по жидким кристаллам: в 4 т.* Одесса : Изд-во Одесского ГУ, 1983. Т. 2. С. 84. [Tsoy V.I. Method for calculating the optical properties of liquid crystal indicators operating on the basis of birefringence of twisted structures. *Theses of the reports of the 5th Conference of the Socialist*

- countries on liquid crystals: in 4 volumes.* Odessa : Odessa State University, 1983, **2**, 84 (in Russ.).
34. Симоненко Г. В., Яковлев Д. А., Цой В. И., Финкель А. Г., Мельникова Г. И. Моделирование жидкокристаллических индикаторов на основе матриц когерентности и Джонса // *Электронная техника. Серия 4.* 1988. № 2. С. 36–41. [Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Fikel' A.G., Mel'nikova G.I. Modeling of liquid crystal indicators based on coherence matrices and Jones. *Electronic Technology. Series 4.* 1988, 2, 36–41 (in Russ.).]
35. Сухарьер А. С., Линькова И. С., Цой В. И., Симоненко Г. В. Особенности динамических характеристик ЖК-ячеек на STN-структуре // *Электронная техника. Серия 4.* 1992. № 4. С. 9–11. [Sukharier A.S., Lin'kova I.S., Tsoy V.I., Simonenko G.V. Features of the dynamic characteristics of LC cells on the STN structure. *Electronic Technology. Series 4,* 1992, 4, 9–11 (in Russ.).]
36. Sevostianov V.P., Simonenko G.V., Brezhnev V.A., Studentsov S.A., Yakovlev D.A. Experimental and theoretical study of optical characteristics of LC shutter on  $\pi$ -cells. *Photonics and Optoelectronics,* 1997, **4** (4), 139–146.
37. Bos P.J., Beran K.R. The  $\pi$ -cell: A fast liquid-crystal optical-switching device. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1984, **113**, 329–339.
38. Симоненко Г. В., Брежнев В. А., Студенцов С. А. Компьютерное моделирование оптического отклика жидкокристаллического дисплея при высоких управляющих напряжениях. Часть 1: Динамика оптического отклика в зависимости от конструктивных параметров дисплея // *Оптический журнал.* 2003. Т. 70, № 7. С. 42–45. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Brezhnev V.A. Computer modeling of the optical response of a liquid crystal display at high control voltages. Part 1: Dynamics of the optical response as a function of the displays design parameters. *Journal of Optical Technology,* 2003, **70** (7), 485–488. DOI: 10.1364/JOT.70.000485].
39. Симоненко Г. В., Брежнев В. А., Студенцов С. А. Компьютерное моделирование оптического отклика жидкокристаллического дисплея при высоких управляющих напряжениях. Часть 2: Влияние параметров жидкокристаллического материала на динамику оптического отклика // *Оптический журнал.* 2003. Т. 70, № 7. С. 46–49. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Brezhnev V.A. Computer modeling of the optical response of a liquid crystal display at high control voltages. Part 2: How the parameters of the liquid crystal material affect the dynamics of the displays optical response. *Journal of Optical Technology,* 2003, **70** (7), 489–491. DOI: 10.1364/JOT.70.000489].

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.  
Received 13 April 2018