

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

Г. В. Симоненко

**МОДУЛЯТОР СВЕТА НА ОСНОВЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА
С СВЕРХЗАКРУЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ, РАБОТАЮЩИЙ В ВОЛНОВОДНОМ РЕЖИМЕ
С АНТИСИММЕТРИЧНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

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

Методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния физических постоянных жидкокристаллического (ЖК) материала на интегральные характеристики модулятора, работающего в волноводном режиме в структуре ЖК с высоким углом закрутки и антисимметричных граничных условиях в рабочей ячейке. Установлено, что полное время срабатывания ЖК-модулятора обратно пропорционально квадрату величины управляющего напряжения и приближается к некоторому постоянному значению при стремлении управляющего напряжения в бесконечность. Малое полное время срабатывания ЖК-модулятора с антисимметричными граничными условиями предположительно обусловлено отсутствием «обратного потока» в ЖК-ячейке при снятии управляющего напряжения и влиянием на динамику переключения только половины толщины рабочего зазора. Определен оптимальный набор физических параметров ЖК-материала, при котором контрастное отношение максимально, а полное время срабатывания модулятора минимально. Установлено, что для каждого ЖК-материала существует собственный режим управления модулятором, а величина управляющего напряжения и способ переключения между состояниями «включено» и «выключено» должны выбираться на основе физических постоянных ЖК и конструктивных параметров устройства.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, модуляторы, компьютерное моделирование.

DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.81

G. V. Simonenko

**LIGHT MODULATOR BASED ON NEMATIC LIQUID CRYSTAL
WITH SUPER-TWISTED STRUCTURE OPERATING IN WAVEGUIDE MODE
WITH ANTISYMMETRIC BOUNDARY CONDITIONS**

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

Using the method of computer simulation, the effect of physical constants of a liquid crystalline (LC) material on integral characteristics of a light modulator was studied. The modulator operated in a waveguide mode in the LC structure with a high twist angle and at antisymmetric boundary conditions of the working cell. It was found that the total response time of the LC modulator is inversely proportional to the square of a control voltage and approaches to a certain constant value when the control voltage tends to infinity. The short total response time of the LC modulator with antisymmetric boundary conditions is presumably conditioned by the absence of a “backflow” in the LC cell when the control voltage is removed and by the fact that only half of the working gap thickness effects the switching dynamics. The optimal set of physical parameters of the LC material was determined, at which the contrast ratio is maximal and the total response time of the modulator is minimal. It was established that each LC material has its own modulator control mode, and the control voltage value and the method of switching between the “on” and “off” states should be selected based on the physical constants of the LC material and the design parameters of the device.

Key words: liquid crystals, modulators, computer simulation.

Введение

В настоящее время жидкие кристаллы (ЖК) нашли широкое применение в разнообразных системах отображения и преобразования информации [1]. Наиболее известными сферами использования ЖК-систем являются всевозможные индикаторные и дисплейные системы [1–4], а также модуляторы оптического излучения [3–7]. В связи с развитием систем виртуальной реальности особый интерес представляет класс ЖК-модуляторов, который называется «Активные 3D очки» [4, 8]. Известно [1, 8], что основным недостатком большинства ЖК-устройств является их относительно малое быстродействие, поэтому значительные усилия исследователей направлено на поиск путей для преодоления этого недостатка. В настоящее время с этой целью нематические ЖК пытаются заменить на смектические [9] или ферроэлектрические [10], однако для этих классов ЖК существуют определенные проблемы, хорошо изложенные в обзоре В. Г. Чигринова [11]. Поэтому основным рабочим ЖК-веществом в системах отображения и обработки информации остается нематик. Как уже отмечалось выше, большим спросом пользуются быстродействующие ЖК-системы [4, 8], выполненные в виде обыкновенных шторок. Сегодня предлагается несколько возможных способов для увеличения быстродействия таких систем: изменение ЖК-вещества внесением в него различных частиц [12]; изменение формы управляющих электродов [13]; поиск оптимальной конструкции ЖК-модулятора [14]. Обычно быстродействующий ЖК-модулятор выполнен на базе всевозможных конструкций π -ячеек [15], в которых используются ЖК-структуры с нулевым или 180° углом закрутки, однако, как показали последние работы, максимальным быстродействием обладает ЖК-шторка, в которой используется ЖК с углом закрутки 270° и с антисимметричными граничными условиями на ориентирующих поверхностях [14]. Такая конструкция ЖК-шторки известна давно [16], но как влияют физические параметры ЖК на ее характеристики при высоких управляющих напряжениях, до сих пор не выяснено. Данная работа направлена на ликвидацию этого пробела и представляет результаты компьютерного моделирования характеристик ЖК-модуляторов оптического излучения.

Характеристики ЖК-устройства обработки информации и их моделирование

ЖК-устройства обработки информации описываются широким набором дифференциальных и интегральных характеристик, к которым относятся электрооптические, оптические и динамические характеристики [17, 18]. Дифференциальными характеристиками ЖК-устройства называются характеристики, которые зависят от длины волны оптического диапазона обрабатываемого сигнала. Интегральными характеристиками ЖК-устройства называются характеристики, усредненные по длине волны оптического диапазона обрабатываемого сигнала. Интегральные характеристики определяются с помощью дифференциальных характеристик, поэтому с точки зрения их моделирования необходимо уметь вычислять дифференциальные характеристики [17–21].

К оптическим характеристикам (как к дифференциальным, так и интегральным) ЖК-модулятора относятся: пропускание, контрастное отношение (или контраст), угловые зависимости контрастного отношения и пропускания, цветовые координаты и ахроматичность открытого и закрытого состояний модулятора [17]. Электрооптические характеристики ЖК-устройства – это его вольт-контрастная характеристика, зависимость его пропускания от управляющего напряжения и степень мультиплексирования устройства [17].

К динамическим характеристикам ЖК-модулятора относятся времена реакции и релаксации при переключении управляющего напряжения из состояния «выключено» в состояние «включено» и обратно [17].

Для выбора оптимальной конструкции ЖК-модулятора достаточно использовать набор только из четырех интегральных оптических характеристик [21]:

- среднее по спектру пропускание ЖК-устройства;
- координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения;
- среднее по спектру контрастное отношение;
- полное время срабатывания ЖК-устройства.

ЖК-затвор может быть описан только 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 λ ; I_{λ} – спектральное распределение источника излучения D_{65} (или какого – либо другого источника излучения); K_{λ} – спектральная чувствительность глаза.

Если максимальное пропускание устройства соответствует состоянию «выключено», а минимальное – состоянию «включено», то такое устройство имеет положительный тип контраста. В противном случае тип контраста отрицательный. Как правило, большинство ЖК-устройств отображения информации имеют положительный тип контраста [22]. В этом случае одной из интегральных оптических характеристик является максимальное пропускание, которое для позитивного контраста является пропусканием устройства в состоянии «выключено» T_{off} . Стоит отметить, что на значения максимального пропускания ЖК-устройства обычно накладывается следующее условие: $T_{off} \geq 35\%$.

Следующей интегральной оптической характеристикой ЖК-устройства преобразования информации является ахроматичность изображения в состоянии с максимальным пропусканием. Эту характеристику удобно использовать вместо цветных координат для этого состояния ЖК-модулятора. Под ахроматичностью H мы понимаем расстояние текущей цветовой точки устройства на цветовом треугольнике от точки белого цвета, например источника D_{65} [23]. Эта характеристика описывает удаленность данной точки от точки белого цвета на цветовом треугольнике и заменяет собой соответствующие цветные координаты x , y .

При этом устройство считается пригодным для использования в полноцветном режиме работы, если для состояния с максимальным пропусканием выполняется условие [24]: $H \leq 0,05$.

Последняя интегральная оптическая характеристика – это среднее по спектру контрастное отношение C . Его величина определяется следующим образом:

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

Обычно ЖК-устройство преобразования информации считается перспективным для дальнейшей эксплуатации, если среднее по спектру контрастное отношение удовлетворяет условию: $C \geq 100:1$.

Если мы рассматриваем ЖК-устройство как оптический затвор, то в качестве электрооптических характеристик нужна только зависимость контрастного отношения устройства от управляющего напряжения, а динамическими характеристиками в этом случае выступают времена переключения между двумя состояниями устройства «включено» и «выключено» и обратно, то есть времена реакции (τ_{on}) и релаксации (τ_{off}). Вместо времен τ_{on} и τ_{off} удобно использовать только одну динамическую характеристику – полное время срабатывания ЖК-устройства τ : $\tau = \tau_{on} + \tau_{off}$.

Характеристики ЖК-затвора определяет большое число его конструктивно-технологических параметров [25–27]. Поэтому для инженерной практики представление об особенностях этих зависимостей можно получить только методом компьютерного моделирования [18–20].

Еще более сложной задачей является поиск оптимальной конструкции такого устройства. В связи с этим нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-устройства использовалась система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD* [18–20, 25–27]. Этот пакет программ позволяет производить моделирование характеристик различных ЖК-устройств с точностью в пределах 10 %, что обычно не превышает погрешность эксперимента, и погрешность моделирования определяется в основном точностью задания физических и конструктивных параметров модулятора.

Конструкция и характеристики модулятора света, работающего в волноводном режиме на основе нематика со сверхзакрученной структурой и антисимметричными граничными условиями

Ранее было показано, что при высоких значениях управляющих напряжений минимальное полное время срабатывания имеет устройство, выполненное на основе ЖК-структуры углом закрутки $\Phi_T = 270^\circ$ при антисимметричных граничных условиях [14]. Подобный ЖК-затвор может работать как в режиме двойного лучепреломления, так и в волноводном режиме, однако устройство, работающее в волноводном режиме, имеет более высокое среднее по спектру контрастное отношение [14]. Поэтому подробнее рассмотрим конструкцию такого ЖК-модулятора и его интегральные характеристики.

Устройство содержит расположенные последовательно на одной оптической оси входной поляризатор, ЖК-ячейку, фазовый компенсатор и выходной поляризатор. Входной и выходной поляризаторы выполнены на основе пленки NPF-F 1205 DU. ЖК-ячейка заполнена нематическим жидким кристаллом с хиральной добавкой, обеспечивающей угол закрутки структуры ЖК на 270° . При этом ЖК-вещество имеет следующие физические параметры: коэффициенты упругости $k_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$ дин; диэлектрические постоянные ЖК $\epsilon_\perp = 4,88$, $\epsilon_\parallel = 13,54$; анизотропия показателей преломления ЖК на различных длинах волн Δn (436 нм) = 0,208, Δn (546 нм) = 0,2, Δn (633 нм) = 0,192), коэффициент вязкости ЖК $\gamma = 0,15$ единиц СГС. Входной поляризатор своим максимальным пропусканием ориентирован по направлению натирания на входной подложке, а выходной поляризатор – по направлению натирания на выходной подложке. Толщина слоя ЖК d_{LC} в рабочей ячейке равна 3,5 мкм. Такая толщина рабочего слоя ЖК выбрана потому, что уменьшение d_{LC} приводит к нарушению волноводного режима ЖК-структуры и сильно ухудшает оптические характеристики ЖК-модулятора, а увеличение d_{LC} влет за собой увеличение времени срабатывания устройства.

Антисимметричные граничные условия на ориентирующих подложках ячейки обусловлены стандартной технологией натирания подложек

ячейки, которая обеспечивает угол преднаклона молекул жидкого кристалла на входной поверхности, равный 2° , а на выходной поверхности – -2° . Значения остальных конструктивных параметров ЖК-ячейки считались равными средним технологическим величинам [28].

Фазовый компенсатор представляет из себя одноосную фазовую пластинку, ориентированную под углом $\gamma = 28^\circ$ к направлению натирания на первой подложке ЖК-ячейки и имеющую оптическую длину $\Delta n d_{\text{phas}} = 0,0345 \text{ мкм}$ (Δn – оптическая анизотропия показателей преломления фазовой пленки на длине волны света 550 нм, d_{phas} – толщина фазового компенсатора).

Устройство работает следующим образом

Если на управляющие электроды не подано напряжение, то ЖК-структура модулятора не искажена. В этом случае свет, проходя сквозь входной поляризатор, становится линейно поляризованным и попадает на ЖК-ячейку. Так как ЖК-структура не искажена, то она поворачивает плоскость поляризации света на 270° и волна проходит через фазовый компенсатор и далее через выходной поляризатор. Так как фазовая задержка фазового компенсатора мала, то она очень слабо искажает линейную поляризацию световой волны, прошедшей сквозь нее, и поэтому такая световая волна полностью проходит через выходной поляризатор. В этом случае модулятор имеет максимальное пропускание.

Если на управляющие электроды подано высокое управляющее напряжение, то в этом случае ЖК-структура модулятора становится сильно искаженной и перестает вращать плоскость поляризации света, прошедшего сквозь кристалл. Так как выходной поляризатор повернут на 90° относительно входного, то свет через такую ЖК-ячейку не проходит. В данном случае фазовый компенсатор служит для преобразования эллиптически поляризованного света, вышедшего из искаженной ЖК-структуры, в свет с линейной поляризацией с направлением поляризации, перпендикулярном направлению максимального пропускания выходного поляризатора. В этом состоянии ЖК-модулятор имеет минимальное пропускание, которое обеспечивает контрастное отношение изображения, сопоставимое с контрастным отношением стандартного твист-модулятора.

На рисунке 1 представлена типичная зависимость среднего по спектру контрастного отношения устройства от управляющего напряжения. Как следует из этого рисунка, зависимость $C = C(U)$ имеет вид кривой с локальным минимумом, что говорит о существовании оптимальной схемы управления ЖК-устройством. Максимальное значение контрастного отношения достигает 350:1. Кроме этого стоит отметить, что в состоянии «выключено» ахроматичность устройства $H < 0,05$, а среднее по спектру пропускание $T_{off} > 38\%$. Эти данные говорят о хороших оптических характеристиках такого ЖК-устройства для использования в качестве ЖК-затвора.

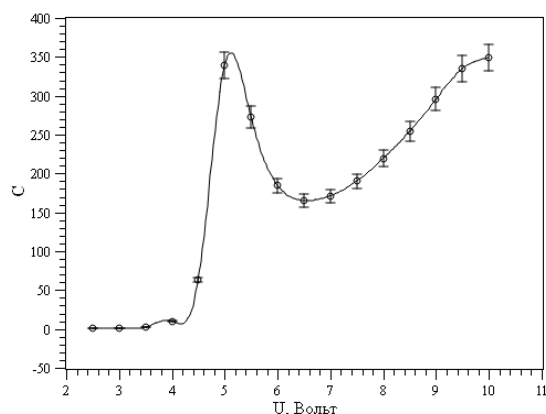


Рис. 1. Зависимость среднего по спектру контрастного отношения ЖК-модулятора от управляющего напряжения

Fig. 1. Dependence of the spectrum-average ratio of the LC-modulator on the control voltage

Время срабатывания ЖК-модулятора складывается из времени включения и времени выключения. Под временем включения понимается время, необходимое ЖК-модулятору для перехода из состояния с нулевым управляющим напряжением в состояние с высоким управляющим напряжением. Под временем выключения понимается время, необходимое ЖК-модулятору для совершения обратного перехода при переключении управляющего напряжения из высокого значения в нулевое. В этом случае малые значения времени срабатывания данного ЖК-модулятора достигаются благодаря трем факторам:

- 1) высокие значения управляющих напряжений;
- 2) антисимметричные граничные условия в структуре;
- 3) малая толщина ЖК-ячейки.

На рисунке 2 представлены типичные зависимости времени реакции (τ_{on}), релаксации (τ_{off}) и полного времени срабатывания (τ) такого ЖК-модулятора от управляющего напряжения U . Анализ зависимости $\tau_{on} = \tau_{on}(U)$ показал, что такая зависимость с 10 %-ой погрешностью может быть аппроксимирована простой функцией

$$\tau_{on} = c + \frac{a}{U^2 - b}, \quad (1)$$

где постоянные a , b и c зависят от физических констант ЖК и граничных условий в ЖК-ячейке (угла закрутки структуры, углов преднаклона молекул ЖК на подложках).

Такой аналитический вид зависимости времени реакции ЖК-устройства от управляющего напряжения известен давно [29, 30] для малых управляющих напряжений. Позднее было показано, что такая аналитическая зависимость τ_{on} от U верна и для высоких значений управляющих напряжений [31]. Существенным отличием в нашем случае от ранее полученных данных является наличие постоянной c , которая ограничивает снизу время реакции и не зависит от напряжения. Это означает, что дальнейшее увеличение управляющего напряжения не приводит к снижению времени реакции устройства. Ситуация с режимом выключения устройства иная. График $\tau_{off} = \tau_{off}(U)$ описывается возрастающей функцией, которая при малых управляющих напряжениях с 10 %-ой погрешностью описывается линейной зависимостью, совпадающей с зависимостью, приведенной в работе [30]. При высоких значениях управляющего напряжения зависимость $\tau_{off} = \tau_{off}(U)$ достигает своего максимального значения и перестает зависеть от U . Зависимость $\tau = \tau(U)$ имеет более сложный характер, так как времена реакции и релаксации ведут себя противоположным образом при изменении управляющего напряжения. Однако эта функция с 20 %-ой погрешностью может быть аппроксимирована выражением аналогичным (1), но с другими значениями постоянных a , b и c .

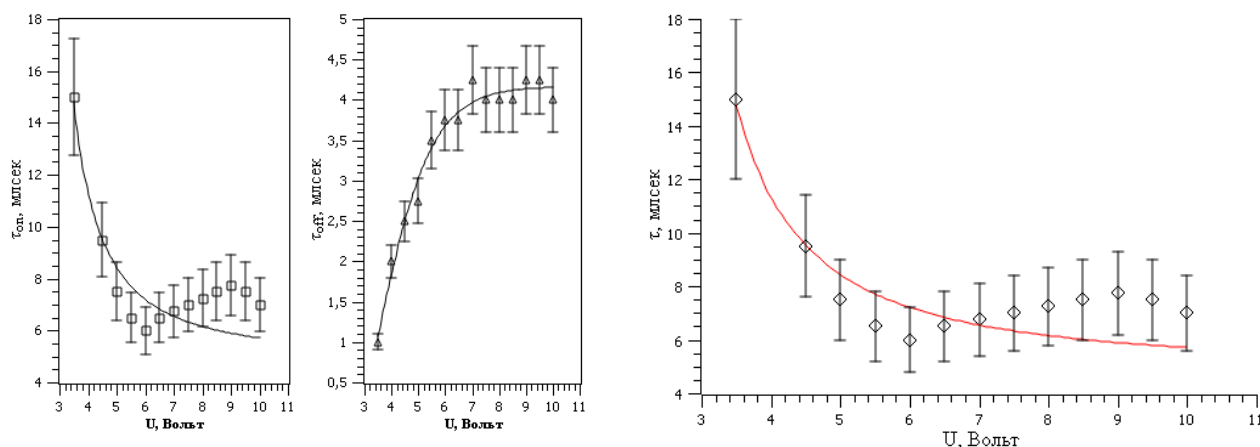


Рис. 2. Зависимость времен реакции (τ_{on}), релаксации (τ_{off}) и полного времени срабатывания ЖК-модулятора (τ) от управляющего напряжения для базового набора физических постоянных ЖК при изменении управляющего напряжения от значения оптического порога до высоких значений

Fig. 2. The dependence of the response time (τ_{on}), relaxation time (τ_{off}) and total response time of the LC-modulator (τ) on a control voltage for the basic set of physical constants of LC when the control voltage changes from the optical threshold value to high values

Несколько слов необходимо сказать о влиянии на время релаксации «обратного потока», который существенным образом влияет на динамику выключения ЖК-модулятора при симметричных граничных условиях [22]. Нами было выполнено компьютерное моделирование динамики переключения ЖК-модулятора с антисимметричными граничными условиями и в результате было установлено, что время релаксации такого устройства одинаково при учете «обратного потока» и без его учета. Можно предположить, что малое время срабатывания ЖК-модулятора с антисимметричными граничными условиями можно объяснить двумя факторами: 1) антисимметричными граничными условиями в ЖК-ячейке, при которых играет роль только половина толщины рабочего зазора [32]; 2) в динамике переключения между двумя состояниями в ЖК-модуляторе с антисимметричными граничными условиями отсутствует влияние «обратного потока».

Результаты моделирования характеристик ЖК-модулятора

Рассмотрим влияние физических параметров ЖК-вещества (анизотропии диэлектрической проницаемости и постоянных упругости) на характе-

ристики ЖК-модулятора, конструкция и физические параметры которого описаны в предыдущем разделе. В качестве рабочих напряжений были выбраны следующие значения: $U_{on} = 8V$, а $U_{off} = 0V$.

Две интегральные характеристики модулятора (среднее пропускание в состоянии «выключено» T_{off} и ахроматичность в этом состоянии H_{off}) не зависят от физических параметров ЖК-вещества, так как это состояние наблюдается при нулевом управляющем напряжении и не зависит от всевозможных параметров и условий. Поэтому далее рассмотрим только зависимость среднего по спектру контрастного отношения C и полного времени срабатывания τ модулятора от физических постоянных ЖК-материала. Кроме этого следует рассмотреть влияние физических постоянных ЖК-материала на величину напряжения оптического порога электрооптического эффекта U_{opt} , на основе которого работает ЖК-модулятор. Напряжение оптического порога — это величина управляющего напряжения в ЖК-ячейке, при которой наступает изменение оптического отклика при наблюдении определенного электрооптического эффекта. В случае эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ЖК величина напряжения оптического порога совпадает с величиной напряжения порога эффекта Фредерикса.

В нашем случае величина напряжения оптического порога волноводного эффекта существенно выше величины напряжения порога Фредерикса, так как для наблюдения этого эффекта требуется существенная деформация ЖК-слоя в рабочей ячейке [22]. Поэтому величина напряжения оптического порога характеризует степень деформации ЖК слоя в рабочей ячейке, что сказывается на полном времени срабатывания ЖК-модулятора.

На рисунке 3 представлены зависимости C , τ и U_{opt} от диэлектрической анизотропии ЖК-материала.

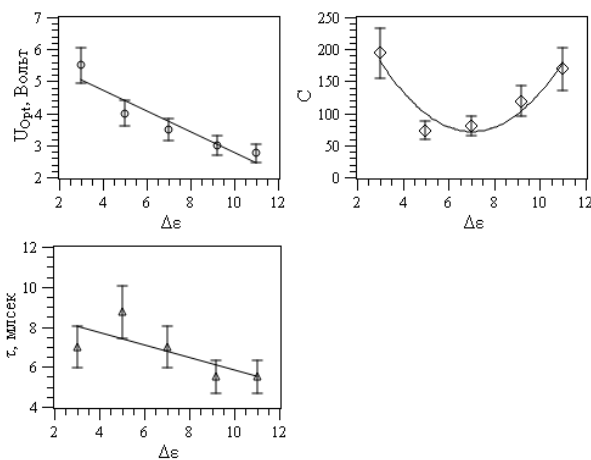


Рис. 3. Зависимость характеристик (оптического порога эффекта U_{opt} , контрастного отношения C и полного времени срабатывания τ) модулятора от анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК $\Delta\epsilon$

Fig. 3. Dependence of the modulator's characteristics (optical threshold of the effect U_{opt} , contrast ratio C and total response time τ) on the anisotropy of the dielectric constant $\Delta\epsilon$ of liquid crystal

Как следует из этого рисунка, зависимости $\tau = \tau(\Delta\epsilon)$ и $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\Delta\epsilon)$ с погрешностью в 15 % описываются линейными регрессиями. Действительно, как известно (см., например, [22]), напряжение порога эффекта Фредерикса U_{Fred} убывает с ростом $\Delta\epsilon$ ЖК-материала ($U_{\text{Fred}} \sim (\Delta\epsilon)^{1/2}$), поэтому величина напряжения оптического порога также убывает, но по линейному закону. В то же время увеличение анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК приводит к уменьшению полного времени срабатывания модулятора из-за того, что при этом возрастает степень деформации слоя ЖК. Последнее обстоятельство приводит к тому, что в зависимости $\tau = \tau(U)$ при малых значениях $\Delta\epsilon$ мы

из левой части этой зависимости попадаем в ее правую часть при больших $\Delta\epsilon$ (см. рис. 2). Это соответствует уменьшению полного времени срабатывания при увеличении анизотропии диэлектрической проницаемости при фиксированном значении напряжения для состояния «включено». Зависимость $C = C(\Delta\epsilon)$ имеет форму кривой с минимумом, что легко можно понять с помощью рис. 1 при условии фиксированного значения управляющего напряжения в состоянии «включено». Действительно, при малых значениях $\Delta\epsilon$, что соответствует средней степени деформации слоя ЖК, мы находимся в левой части кривой $C = C(U)$ рис. 1. Дальнейшее увеличение $\Delta\epsilon$ приводит к увеличению степени деформации ЖК-слоя и к попаданию в область минимума кривой $C = C(U)$. При максимальных значениях $\Delta\epsilon$, что соответствует большой степени деформации слоя ЖК, попадаем в правую часть графика функции $C = C(U)$ с максимальным значением контрастного отношения. Таким образом, в описанном выше ЖК-модуляторе для одновременного достижения высоких значений контрастного отношения и малого полного времени срабатывания устройства необходимо выбирать ЖК-материал с высоким значением его диэлектрической анизотропии.

Зависимости C , τ и U_{opt} от отношения констант упругости k_{33}/k_{11} и k_{33}/k_{22} ЖК-материала представлены на рис. 4. Пусть $\omega_1 = k_{33}/k_{11}$, $\omega_2 = k_{33}/k_{22}$. Как следует из этого рисунка, поведение зависимостей $C = C(\omega_1)$, $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_1)$ и $\tau = \tau(\omega_1)$ противоположно поведению функций $C = C(\omega_2)$, $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_2)$ и $\tau = \tau(\omega_2)$.

При этом зависимости $C = C(\omega_1)$, $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_1)$ с погрешностью 10 % являются линейными регрессиями, зависимости $C = C(\omega_2)$, $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_2)$ – линейными прогрессиями с той же погрешностью. Такое поведение зависимостей $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_1)$ и $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\omega_2)$ объясняется следующим образом. Величина напряжения перехода Фредерикса зависит от этих параметров так:

$$U_{\text{Fred}} \sim (k_{11} \cdot (1 + C_a \cdot \omega_1 \cdot (1 - 2/\omega_2 C_b)))^{1/2}, \quad (2)$$

где C_a и C_b – постоянные величины, определяемые ЖК-материалом.

Отношение постоянных упругости ЖК ω_1 увеличивалось за счет уменьшения k_{11} , а параметр ω_2 при этом оставался постоянным. Как следует из выражения (2), с ростом ω_1 U_{Fred} уменьшается, что приводит и к уменьшению U_{opt} .

В свою очередь, отношение постоянных упругости ЖК ω_2 , увеличивалось за счет уменьшения k_{22} , а параметр ω_1 при этом оставался постоянным. В соответствии с выражением (2) это приводит к увеличению U_{Fred} , а соответственно и U_{opt} . Кроме этого из рис. 4 следует, что зависимости контрастного отношения полного времени срабатывания ЖК-модулятора от отношений коэффициентов упругости ЖК ω_1 и ω_2 говорят о наличии оптимальных значений этих параметров, при которых достигается максимально возможное значение контрастного отношения и одновременно с этим минимального значения полного времени срабатывания устройства. Противоположное поведение зависимостей $C = C(\omega_1)$ и $C = C(\omega_2)$ объясняется тем, что противоположным образом от этих параметров зависят величины напряжений оптических порогов, которые характеризуют степень искажения слоя ЖК в рабочей ячейке. При этом при фиксированном значении управляющего напряжения контрастное отношение тем выше, чем меньше напряжение оптического порога, то есть чем больше деформирован ЖК-слой. Аналогично объясняется противоположный характер поведения кривых $\tau = \tau(\omega_1)$ и $\tau = \tau(\omega_2)$. Нелинейный характер зависимостей $\tau = \tau(\omega_1)$ и $\tau = \tau(\omega_2)$ можно понять исходя из комплексного влияния на динамику переключения параметров ω_1 и ω_2 , которое не позволяет получить простые выражения для этих функций. Все эти зависимости говорят о наличии оптимального набора постоянных упругости ЖК-материала, при котором одновременно реализуется высокое контрастное отношение и малое полное время срабатывания модулятора. Для этого необходимо выбирать ЖК-материал, у которого величина параметра ω_1 находится вблизи единицы, а величина параметра ω_2 – около трех.

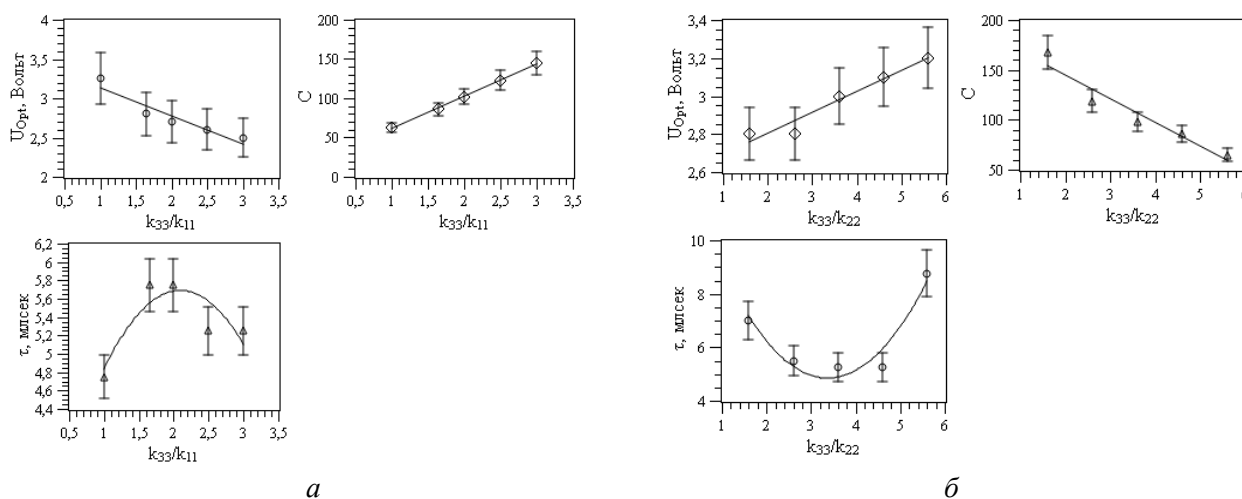


Рис. 4. Зависимость характеристик (оптического порога эффекта U_{opt} , контрастного отношения C и полного времени срабатывания τ) модулятора от отношения коэффициентов упругости ЖК k_{33}/k_{11} (а) и k_{33}/k_{22} (б)

Fig. 4. Dependence of the modulator's characteristics (optical threshold of the effect U_{opt} , contrast ratio C , and total response time τ) on the ratio of LC elasticity coefficients k_{33}/k_{11} (a) and k_{33}/k_{22} (b)

Из предыдущих результатов следует, что величины характеристик ЖК-модулятора C , τ и U_{opt} должны зависеть от абсолютной величины коэффициентов упругости ЖК при постоянных значениях параметров ω_1 и ω_2 . На рисунке 5 представлены зависимости этих характеристик от величины среднего коэффициента упругости ЖК K ($K = (k_{11} + k_{22} + k_{33})/3$).

Зависимость $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(K)$ является линейной прогрессией с погрешностью 10 %, которую легко понять с помощью выражения (2). А зависимость $C = C(K)$ объясняется следующим образом. Функция $C = C(U)$ имеет форму, которая не зависит от каких-либо параметров. Если величина управляющего напряжения фиксирована, то поэтому при малых значениях параметра K мы попадаем

в область высоких деформационных искажений слоя ЖК, то есть на рис. 1 это крайняя правая часть кривой $C = C(U)$. Соответственно при средних значениях этого параметра мы попадаем в область локального минимума этой кривой, а при больших значениях K – в область слева от локального минимума этой кривой.

Отдельного рассмотрения требует зависимость $\tau = \tau(K)$. Действительно, известно, что времена реакции и релаксации обратно пропорциональны значению коэффициента упругости ЖК [22]. Однако надо вспомнить, что мы находимся в режиме фиксированного значения управляющего напряжения для состояния «включено». В этом режиме при увеличении параметра K растет и значение порогового напряжения. Это приводит к тому, что степень деформации ЖК-слоя падает, что,

как известно, приводит к росту полного времени реакции модулятора. Этот вывод подтверждается выполненными нами расчетами при фиксации не абсолютного значения управляющего напряжения в состоянии «включено», а фиксации нормированного на пороговое значение напряжения перехода Фредерикса $U_{\text{por}} = U_{\text{on}}/U_{\text{Fred}}$. В этом случае при одном и том же значении U_{por} времена полного срабатывания модулятора одинаковы. Последнее обстоятельство говорит о том, для каждого ЖК-материала существует собственный режим управления модулятором. Величина управляющего напряжения и способ переключения между состояниями «включено» и «выключено» должны выбираться на основе физических постоянных ЖК и конструктивных параметров устройства.

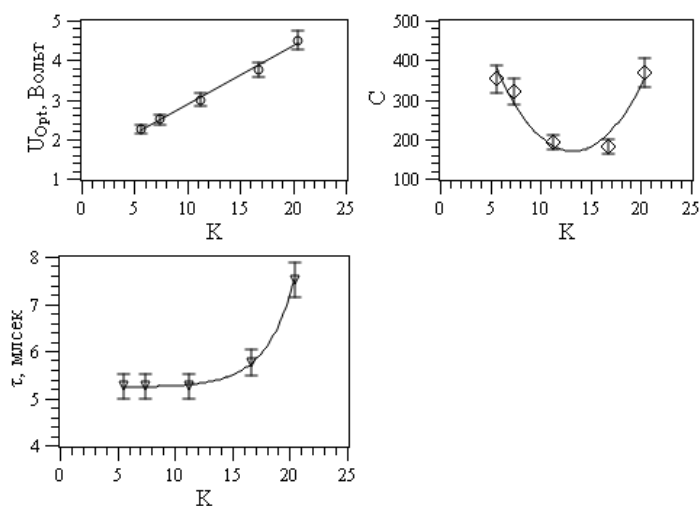


Рис. 5. Зависимость характеристик (оптического порога эффекта U_{Opt} , контрастного отношения C и полного времени срабатывания τ) модулятора от величины среднего коэффициента упругости ЖК при постоянном управляющем напряжении $U_{\text{on}} = 8$ В

Fig. 5. Dependence of the modulator's characteristics (optical threshold of the effect U_{Opt} , contrast ratio C , and total response time τ) on the mean LC elasticity coefficient at a constant control voltage $U_{\text{on}} = 8$ V

Заключение

В настоящей работе методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния физических постоянных ЖК-материала на интегральные характеристики модулятора. Устройство работает в волноводном режиме в структуре ЖК с углом закрутки 270° и антисимметричных граничных условиях в рабочей ячейке. Показано, что:

- полное время срабатывания ЖК-модулятора обратно пропорционально квадрату величины управляющего напряжения и приближается к некоторому постоянному значению при стремлении управляющего напряжения в бесконечность;
- при антисимметричных граничных условиях малое полное время срабатывания ЖК-моду-

лятора обусловлено отсутствием «обратного потока» в ЖК-ячейке и тем, что в динамике переключения между двумя состояниями в таком ЖК-модуляторе играет роль только половина толщины рабочего зазора;

- для одновременного достижения высоких значений контрастного отношения и малого полного времени срабатывания устройства необходимо выбирать ЖК-материал с высоким значением его диэлектрической анизотропии;
- существует оптимальный набор постоянных упругости ЖК-материала, при котором одновременно реализуется высокое контрастное отношение и малое полное время срабатывания модулятора, для этого необходимо выбирать ЖК-материал, у которого величина параметра ω_1 находится

вблизи единицы, а величина параметра ω_2 – около трех;

- для каждого ЖК-материала существует собственный режим управления модулятором, а величина управляющего напряжения и способ переключения между состояниями «включено» и «выключено» должны выбираться на основе физических постоянных ЖК и конструктивных параметров устройства.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-07-01005.

Список литературы / References

1. Jones Cliff J. The fiftieth anniversary of the liquid crystal display. *Liquid Crystals Today*, 2018, **27** (3), 44–70.
2. Khokhlov A.R., Emel'yanenko A.V. Nanostructured liquid crystal systems and applications. *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2018, 9, 2644–2645.
DOI: 10.3762/bjnano.9.245.
3. Беляев В. В., Островский Б. И., Пикина Е. С. 14-я Европейская конференция по жидким кристаллам (ECLC-2017), 25–30 июня 2017, Москва // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2018. Т. 18, № 1. С. 84–94. [Belyaev V.V., Ostrovsky B.I., Pikina E.S. The 14th European conference on liquid crystals (ECLC 2017), June 25–30, 2017, Moscow. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (1), 84–94 (in Russ.).
DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.84].
4. Минько А. А. Физика жидких кристаллов: учебное пособие. Минск : БГУ, 2017. 111 с. [Minko A.A. Physics of liquid crystals: a tutorial. Minsk : BSU, 2017, 111 p. (in Russ.).]
5. Qifeng Niu, Chunyang Wang, Hongwei Shi. Phase modulation characteristics analysis of liquid crystal spatial light modulator under oblique incidence. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90, 055001.
DOI: 10.1063/1.5087535.
6. Santec Corporation. Spatial Light Modulator [Электронный ресурс]:
https://www.santec.com/en/products/components/slm?gclid=EAIaIQobChMIzMDt4fiP6gIVAcKyCh2oCwvOEAAAYAiAAEgKp6PD_BwE (data obrashcheniya: 20.01.2021).
7. Meadowlark Optics, Inc. Spatial Light Modulator [Электронный ресурс]:
https://www.meadowlark.com/?gclid=EAIaIQobChMIzMDt4fiP6gIVAcKyCh2oCwvOEAMyASAAEgLnFD_BwE (data obrashcheniya: 20.01.2021).
8. 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 display devices and photonics. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 7–27. (in Russ.).]
9. Заляпин Н. В., Андреев А. Л., Компанец И. Н. Модуляция лазерного излучения на основе электроуправляемого изменения двулучепреломления и светорассеяния в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах // *Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования: сб. статей по материалам V–VI Междунар. научн.-практ. конф. М. : Интернаука, 2017. Т. 5–6, № 3. С. 69–88. [Zalyapin N.V., Andreev A.L., Kompanets I.N. Modulation of laser radiation based on electrically controlled changes in birefringence and light scattering in nonhelical ferroelectric liquid crystals. *Chemistry, physics, biology, mathematics: theoretical and applied research: a collection of articles based on the materials of the V–VI Intern. Sci. and Pract. Conf. M.: Internauka, 2017, 5–6* (3), 69–88. (in Russ.).]*
10. Kompanets I.N., Andreev A.L. Microdisplays in spatial light modulators. *Quantum Electronics*, 2017, **47** (4), 294–302.
11. Чигринов В. Г., Шривастава А. К., Пожидаев Е. П. Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы: физика и области применения // *Жидк. крист. и их практич. использ.*, 2016. Т. 16, № 1. С. 9–21. [Chigrinov V.G., Shrivastava A.K., Pozhidaev E.P. Ferroelectric liquid crystals: physics and applications. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **16** (1), 9–21. (in Russ.).
DOI: 10.18083/LCAppl.2016.1.9].
12. Каманина Н. В., Зубцова Ю. А., Тойка А. С., Лихоманова С. В., Zak A., Tenne R. Временные характеристики жидкокристаллической ячейки с наночастицами WS₂: сенсibilизация мезофазы и особенности рельефа // *Жидк. крист. и их практич. использ.*, 2020. Т. 20, № 1. С. 34–40. [Kamanina N.V., Zubtsova Yu.A., Toikka A.S., Likhomanova S.V., Zak A., Tenne R. Temporal characteristics of a liquid crystal cell with WS₂ nanoparticles: mesophase sensitization and relief features. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (1), 34–40. (in Russ.).
DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.34].
13. Гейвандов А. Р., Симдянкин И. В., Барник М. И., Палто В. С., Палто С. П. Быстрая мода в электрооптическом переключении жидкокристаллической ячейки при уменьшении периода электродных решеток // *Кристаллография*. 2019. Т. 64, № 3. С. 407–411. [Geyvandov A.R., Simdyankin I.V., Barnik M.I., Palto V.S., Palto S.P. Fast mode in electro-optical switching of a liquid crystal cell with a decrease in the period of the electrode lattices. *Cystallography*, 2019, 64 (3), 407–411. (in Russ.).]

-
-
14. Simonenko G.V. Computer analysis of the influence of technological parameters of a hightspeed liquid crystal modulator on its integral characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1560, 012028. DOI:10.1088/1742-6596/1560/1/012028.
 15. Патент РФ 2488150. Мультистандартные жидкокристаллические очки / Студенцов С. А., Ежов В. А.; приор. от 30.12.2011. [Russian patent RU № 2488150. Multi-standard liquid crystal glasses / Studetsov S.A., Ezhov V.A.; priority 30.12.2011. Right holders: Studentsov S.A., Ezhov V.A. (in Russ.)].
 16. Patent US 5327269. Fast switching 270° twist nematic liquid crystal device and eyewear incorporating the device / L. Lipton, M. Tilton; 1994. [Электронный ресурс]. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/41/56/d10f69283db7b5/US5327269.pdf> (data obrashcheniya 20.01.2021).
 17. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов : Изд-во Саратовского университета, 2018. 134 с. [Simonenko G.V. Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals. Saratov : Saratov University, 2018, 134 p. (in Russ.)].
 18. 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.
 19. Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Chigrinov V.G. Advanced Tools for Modeling of 2D – Optics for LCDs. *SID Digest*, 2005, 59–61.
 20. Chigrinov V.G., Yakovlev D.A. Optimization and Modeling of Liquid Crystal Displays. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2006, 453, 107–121.
 21. Симоненко Г. В. Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81, № 10. С. 50–55. [Simonenko G.V. Analysis of various designs of an optical liquid crystal shutter. *Optical Journal*, 2014, **81** (10), 50–55. (in Russ.)].
 22. Сухариев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukhariev A.S. Liquid crystal indicators. Moscow : Radio i svyaz, 1991, 256 p. (in Russ.)].
 23. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники: учебник для вузов. М. : Изд-во МГУП, 2002. [Shashlov A.B., Uvarova R.M., Churkin A.V. Basics of lighting: Textbook for high schools. Moscow : MGUP Publisher, 2002 (in Russ.)].
 24. 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 an LCD modulator for 3d applications. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 82–90. (in Russ.)].
 25. 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. [Электронный ресурс]. 2002. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283> (data obrashcheniya: 20.01.2021).
 26. 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 // *Информ. Сер. Средства отображения информации /ВНИИ межотрасл. инф.*, 1993. № 2. С. 90–94. [Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Khokhlov N.A., Podyachev Yu.B. Universal complex of computer programs for optimizing the design of liquid crystal displays. *Inform. Ser. Means of information display / VNI interindustry. inf.*, 1993, 2, 90–94. (in Russ.)].
 27. Финкель А. Г., Цой В. И., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А. Проектирование ЖК-устройств отображения информации // *Электронная промышленность*. 2000. № 2. С. 11–16. [Finkel A.G., Tsoi V.I., Simonenko G.V., Yakovlev D.A. Designing LCD-devices for displaying information. *Electronic industry*, 2000, 2, 11–16].
 28. 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 π -cells. *Photonics and Optoelectronics*, 1997, **4** (4), 139–146.
 29. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с. [Blinov L.M. Electro- and magnetooptics of liquid crystals. Moscow : Nauka, 1978, 384 p. (in Russ.)].
 30. Сухариев А. С., Линькова И. С., Цой В. И., Симоненко Г. В. Особенности параметров быстродействия и их зависимость от параметров ЖК и ЖК-структуры в ЖК-ячейках на супертвисте // *Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы*. 1991. Вып. 4 (135). С. 59–64. [Sukhariev A.S., Linkova I.S., Tsoi V.I., Simonenko G.V. Features of the response parameters and their dependence on the parameters of the liquid crystal and liquid crystal structure in liquid crystal cells on supertwist. *Electronic engineering. Ser. 4. Electrovacuum and gas-discharge devices*, 1991, **4** (135), 59–64. (in Russ.)].

31. 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., Brezhnev V.A., Studentsov S.A. Computer simulation of the optical response of a liquid crystal display at high control voltages. Part 1. The dynamics of the optical response depending on the design parameters of the display. *Optical Journal*, 2003, **70** (7), 42–45. (in Russ.)].
32. Симоненко Г. В. Влияние углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках на характеристики жидкокристаллических модуляторов на основе π -ячеек // *Жидк. крист. и их*

практич. использ., 2018. Т. 18, № 3. С. 26–36. [Simonenko G.V. Influence of the pre-tilt angles of LC molecules on orienting substrates on the characteristics of liquid-crystal modulators based on π -cells. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 26–36. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.26].

Поступила 1.02.2021 г.

Received 1.02.2021

Принята 10.03.2021 г.

Accepted 10.03.2021