

Научная статья

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНОГО ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ОТ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Георгий Валентинович Симоненко*

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 6.12.2021

Одобрена 11.01.2022

Принята 15.01.2022

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
модуляторы,
компьютерное
моделирование

АННОТАЦИЯ

Методом компьютерного моделирования выполнено исследование зависимости полного времени срабатывания нематического модулятора света от управляющего напряжения для различных условий ориентации молекул жидкого кристалла на граничных поверхностях. Найдена простая аналитическая зависимость полного времени срабатывания нематического модулятора света от управляющего напряжения для всего диапазона его изменения. Показано, что полное время срабатывания нематического модулятора света произвольной конструкции при высоких значениях управляющего напряжения не зависит от его величины, а определяется только конструктивными и физическими параметрами устройства. Установлено, что при одном и том же наборе физических и конструктивных параметров ЖК-устройства минимальное значение времени срабатывания нематического модулятора света меньше у устройства с антисимметричными граничными условиями, чем у модулятора с симметричными граничными условиями.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.1.47

Для цитирования:

Симоненко Г. В. Параметризация зависимости полного времени срабатывания жидкокристаллического модулятора от управляющего напряжения // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 1. С. 47–55.

*Адрес для переписки: gvsim1960@hotmail.com

© Симоненко Г. В., 2022

Research Article

PARAMETRIZATION OF TOTAL OPERATION TIME DEPENDENCE OF LIQUID CRYSTAL MODULATOR ON CONTROL VOLTAGE

Georgy V. Simonenko

Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russia

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 6 December 2021

Approved 11 January 2022

Accepted 15 January 2022

Key words:

liquid crystals,
modulators,
computer simulation

ABSTRACT

The dependence of the total response time of a nematic light modulator on control voltage for various orientation conditions of liquid crystal molecules on boundary surfaces has been established by the method of computer simulation. A simple analytical dependence of the total response time of the nematic light modulator on control voltage is found for the entire range of its variation. It is shown that the total response time of the nematic light modulator of an arbitrary design at high values of control voltage does not depend on control voltage value but determined only by the design and physical parameters of the device. It was found that with the same set of physical and design parameters of a LC device, the minimum response time of the nematic light modulator is less for the device with antisymmetric boundary conditions than for the modulator with symmetric boundary conditions.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.1.47

For citation:

Simonenko G. V. Parametrization of total operation time dependence of liquid crystal modulator on control voltage. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 47–55 (in Russ.).

Введение

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) до сих пор широко используются в различных электрооптических системах обработки и отображения информации [1, 2]. Чаще всего устройства на основе НЖК применяются в различных нематических модуляторах света (НМС) [3]. Вместе с этим у таких электрооптических устройств имеется существенный недостаток – это ограничение их быстродействия [4]. Для решения этой проблемы совершенствуют как методы измерения времени отклика НМС [5], так и способы управления такими устройствами [3]. Одним из эффективных способов изменять время срабатывания НМС является изменение управляющего напряжения [3], однако до сих пор отсутствует простое выражение, которое связывало бы время срабатывания НМС с величиной управляющего напряжения для различных конструкций подобных устройств. Конструкция НМС определяется в основном граничными условиями: 1) углом закрутки структуры ЖК (Φ_T) в рабочей ячейке; 2) углами преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях (симметричные или антисимметричные углы преднаклона). В настоящей работе предлагается единая аналитическая зависимость времени срабатывания НМС от значения управляющего напряжения во всем диапазоне изменения его величины для различных конструкций ЖК-устройства.

Основные сведения по динамике перехода Фредерикса в НМС

Как известно, принцип работы НМС основан на том, что в одном состоянии, когда на затвор управляющее напряжение (U_{off}) не подано или его значение ниже порогового (состояние «выключено»), то устройство характеризуется значением среднего по спектру пропускания T_{off} . Во втором состоянии («включено») на устройство подано напряжение (U_{on}) выше порогового значения, и оно описывается средним по спектру пропусканием T_{on} [3, 6]. Между этими двумя состояниями обеспечивается необходимый контраст изображения. Обычно для описания динамики переключения ЖК-затвора из одного состояния в другое и обратно используются значения времен реакции и релаксации НМС [6]. При этом под временем реакции τ_{reac} ЖК-

устройства (релаксации τ_{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}). С точки зрения поиска оптимальной конструкции НМС удобно использовать понятие полного времени срабатывания устройства (или времени срабатывания) τ , которое в данном случае определяется так [7]:

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

Время срабатывания НМС зависит от большого числа физических и конструктивных параметров устройства, в том числе и от значений управляющих напряжений. Если физические и конструктивные параметры НМС менять достаточно сложно, то выбор значений управляющих напряжений осуществить можно легко, что широко используется в системах управления ЖК-устройствами. Известные аналитические зависимости времен реакции и релаксации от управляющего напряжения [6, 7]:

$$\tau_{reac} \approx \frac{\Omega}{U_{on}^2 - U_{off}^2}, \quad \tau_{relax} \approx \sigma(U_{on} - U_{off})^\alpha, \quad (1)$$

где величины параметров σ , α и Ω определяются значениями физических и конструктивных параметров ЖК-ячейки, используемой в модуляторе, получены при условии, когда значения управляющих напряжений несильно отличаются от напряжения порога Фредерикса.

При изменении управляющего напряжения в широком диапазоне, когда значение U_{on} превышает порог Фредерикса в десятки раз, зависимости $\tau_{reac} = \tau_{reac}(U_{on})$ и $\tau_{relax} = \tau_{relax}(U_{on})$ имеют вид, представленный на рис. 1. Зависимости $\tau_{reac} = \tau_{reac}(U_{on})$ и $\tau_{relax} = \tau_{relax}(U_{on})$ получены путем компьютерного моделирования с помощью программного комплекса MOUSE-LCD, который позволяет производить моделирование характеристик различных ЖК-устройств с точностью в пределах 10 % [9–11]. Анализ этих зависимостей показывает, что аналитические выражения (1) описывают только начальные участки кривых $\tau_{reac}(U_{on})$ и $\tau_{relax}(U_{on})$, а при высоких значениях управляющих напряжений это не так. В то же время наши исследования показали [8], что зависимость $\tau = \tau(U_{on})$ для некоторых конструкций НМС с погрешностью в 10 % может быть аппроксимирована следующей функцией:

$$\tau = a + \frac{b}{U_{on}^2 - c^2}, \quad (2)$$

где постоянные a , b и c определяются физическими параметрами ЖК-вещества и конструктивными параметрами НМС.

Поэтому целью этой статьи является ответ на два вопроса: 1) можно ли выражение (2) использовать для любых конструкций НМС; 2) каков физический смысл постоянных a , b и c .

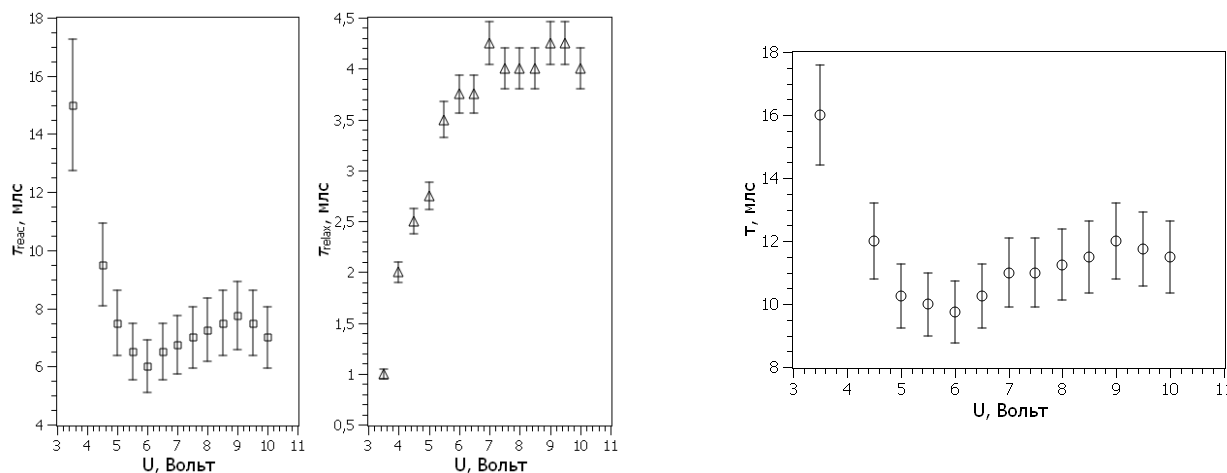


Рис. 1. Зависимости времен реакции, релаксации и времени срабатывания НМС от управляющего напряжения, представленная в работе [8]

Fig. 1. The dependences of response time, relaxation time and NMS response time on control voltage, presented in [8]

Результаты и их обсуждение

Для ответа на поставленные выше вопросы рассмотрим влияние основных технологических параметров на время срабатывания НМС. Для этой цели использовался метод компьютерного моделирования динамических характеристик НМС с помощью комплекса MOUSE-LCD [9–11]. Из всех конструктивных параметров ЖК-модулятора (кроме толщины ЖК-слоя d) максимальное влияние на его оптические и динамические характеристики оказывают граничные условия в рабочей ЖК-ячейке [6, 12]. Поэтому мы исследовали динамику переключения НМС, выполненного на основе тонких ЖК-ячеек с симметричными и антисимметричными граничными условиями и различными углами закрутки структуры Φ_T . В исследованиях считалось, что ячейка заполнена ЖК-смесью со следующими физическими параметрами: $k_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\varepsilon_{\perp} = 4,88$, $\varepsilon_{\parallel} = 13,54$, вращательная вязкость $\gamma_1 = 0,15$ единиц СГС. Анизотропия показателей преломления ЖК $\Delta n = 0,2$ (на длине волны 550 нм), ее дисперсия – слабая. Во всех

расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными.

В качестве поляризаторов использовалась пленка $NPF - F 1205 DU$. Для НМС с углами закрутки ЖК-структуры $\Phi_T > 90^\circ$ шаг хиральной добавки p_0 в ЖК-смеси соответствовал центральной зоне Гранжана [6]. Технологические параметры (толщины и показатели преломления) стеклянных подложек, электродных и ориентирующих слоев были взяты из работы [13]. Чтобы исключить влияние величины управляющего напряжения в состоянии «выключено» на характеристики модулятора, во всех случаях считалось, что $U_{off} \leq U_{Fred}$ (U_{Fred} – пороговое напряжение перехода Фредерикса). Для исключения влияния на динамику переключения НМС толщины ЖК-слоя в численных экспериментах она была постоянной ($d = 3,5$ мкм). Для антисимметричных граничных условий угол преднаклона на одной ориентирующей подложке в ячейке θ_{01} , а на противоположной – $\theta_{02} = -\theta_{01}$. При симметричных граничных условиях значения углов преднаклона на обеих ориентирующих поверхностях были одинаковы ($\theta_{02} = \theta_{01}$).

Для исследования динамики перехода Фредерикса из одного состояния в другое обычно используют эффект интерференции поляризованных лучей (интерференционный режим) в ЖК-структуре, так как в этом случае изменение оптического отклика следует за деформационным искажением директора ЖК с малыми задержками в управляющем напряжении. Поэтому угол ориентации входного поляризатора составлял 45° к направлению ориентации молекул ЖК на первой подложке, а угол ориентации выходного поляризатора равнялся -45° к тому же направлению.

В результате компьютерного моделирования динамики перехода НМС различных конструкций выяснилось, что выражение (2) с погрешностью 10 % описывает зависимость времени срабатывания τ такого ЖК-устройства от управляющего напряжения U_{on} при изменении последнего в произвольных пределах. В пределах одного типа граничных условий время срабатывания НМС слабо зависит от

величины угла преднаклона на ориентирующей поверхности ЖК-ячейки [14]. Различие времен срабатывания НМС существует только между симметричными и антисимметричными граничными условиями на подложках рабочей ЖК-ячейки. При этом время срабатывания НМС с симметричными граничными условиями в 1,5–2 раза больше времени срабатывания НМС с антисимметричными граничными условиями. Поэтому эмпирические параметры a , b и c в зависимости $\tau = \tau(U_{on})$ постоянны в пределах одного типа граничных условий (симметричных или антисимметричных). Как было показано ранее [15], время полного срабатывания линейно зависит от величины угла закрутки структуры в рабочей ячейке НМС. Исходя из этого и результатов нашего исследования, можно считать, что эмпирические параметры a , b и c с погрешностью 15 % также линейно зависят от угла закрутки ЖК-структуры в рабочей ячейке НМС (рис. 2).

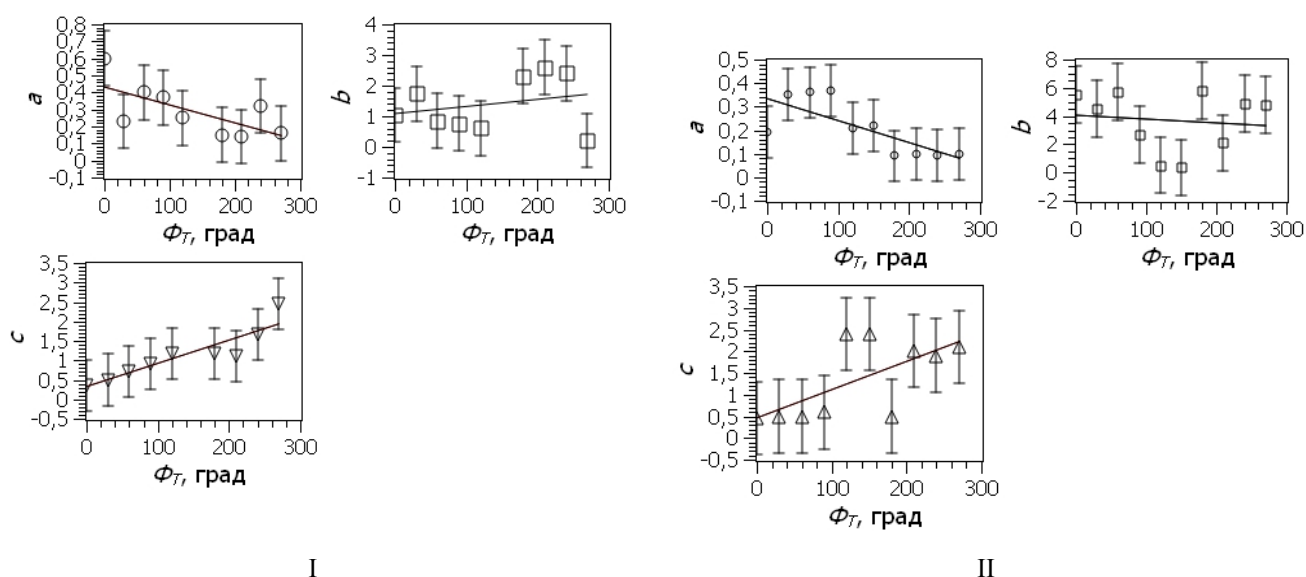


Рис. 2. Зависимости параметров a , b , c от угла закрутки структуры ЖК.
 I – симметричные граничные условия, II – антисимметричные граничные условия

Fig. 2. Dependences of parameters a , b , c on twist angle of LC structure.
 I – symmetric boundary conditions, II – antisymmetric boundary conditions

Таким образом, мы показали, что зависимость времени срабатывания НМС от величины управляющего напряжения в состоянии «включено» описывается выражением (2) для любой конструкции подобного ЖК-устройства. При этом эмпирические параметры a , b и c в выражении (2) в пределах одного типа граничных условий (симметричных или антисимметричны) слабо зависят от величин углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях (θ_{01} , θ_{02}) и описываются линейными функциями, зависящими от угла закрутки ЖК-структуры Φ_T в рабочей ячейке. Основным отличием выражения (2), описывающего зависимость времени срабатывания НМС от управляющего напряжения в состоянии «включено» от широко известной формулы (1), состоит в том, что при стремлении U_{on} к бесконечно большим величинам, τ стремится не к 0, к конечному значению – минимальному времени срабатывания НМС $\tau^{\min} = a$. Это означает, что существует некоторое предельное значение U_{on} , больше которого увеличивать управляющее напряжение смысла не имеет, так как время срабатывания устройства уменьшаться не будет.

Перейдем к выяснению физического смысла эмпирических параметров в зависимости (2). Очевидно, что минимальное время срабатывания τ^{\min} (параметр a) НМС не может быть меньше, чем постоянная времени τ_0 , связанная с ориентационными эффектами [16]:

$$\tau_0 = \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K},$$

где γ – средняя вязкость ЖК, K – средний коэффициент упругости ЖК.

В то же время минимальное время срабатывания τ^{\min} НМС с увеличением угла закрутки структуры ЖК в рабочей ячейке Φ_T линейно уменьшается (рис. 2, 3).

Анализ полученных нами данных показывает, что для симметричных граничных условий в рабочей ЖК-ячейке НМС зависимость $\tau^{\min} = \tau^{\min}(\Phi_T)$ может быть описана с погрешностью 15 % следующей линейной регрессией:

$$a = \tau^{\min} \approx \tau_0(r_1 - r_2 \cdot \Phi_T).$$

Для антисимметричных граничных условий такая же зависимость описывается с той же погрешностью несколько другой линейной регрессией:

$$a = \tau^{\min} \approx \tau_0(r_1 - r_2 \cdot \Phi_T)/2.$$

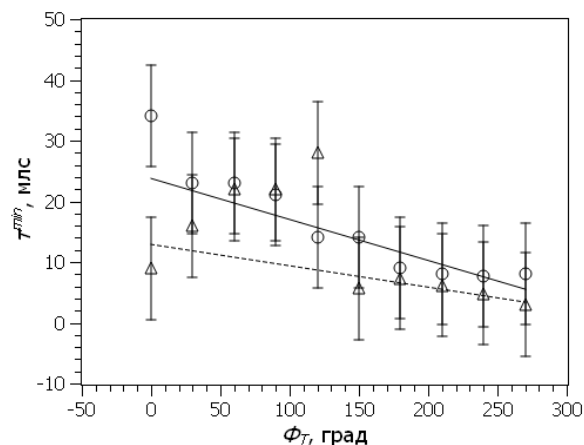


Рис. 3. Зависимость минимального полного времени срабатывания устройства от угла закрутки структуры ЖК: Δ – антисимметричные граничные условия, O – симметричные граничные условия

Fig. 3. Dependence of minimum total response time of the device on the twist angle of LC structure:

Δ – antisymmetric boundary conditions; O – symmetric boundary conditions

Таким образом, минимальное время срабатывания однозначно определяется величиной постоянной времени τ_0 ориентационных эффектов. Кроме этого, величина τ^{\min} зависит от типа симметрии граничных условий в рабочей ЖК-ячейке НМС и угла закрутки структуры в ней. Постоянные линейной регрессии r_1 и r_2 зависят от физических постоянных ЖК (упругих постоянных, диэлектрической анизотропии, коэффициентов вязкости) и в данном конкретном случае $r_1 = 2$ и $r_2 = 1/3$.

Рассмотрим физический смысл параметра c в выражении (2). Как следует из этого выражения, этот параметр имеет размерность напряжения, поэтому исходя из ранее известного соотношения времени реакции и управляющего напряжения (1) стоит ожидать, что параметр c связан с пороговым напряжением эффекта интерференции поляризованных лучей. При этом следует различать пороговое напряжение перехода Фредеркса U_{Fred} и напряжение оптического эффекта интерференции поляризованных лучей U_{opt} . Значение U_{Fred} для симметричных граничных условий при малых значениях углов преднаклона молекул ЖК на полках рабочей ячейки НМС (θ_{01} , $\theta_{02} \leq 2^\circ$) можно вычислить с помощью известного выражения [17]:

$$U_{Fred} = 2\pi \sqrt{\frac{\pi k_{11}}{\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp}} \left(1 + \left(\frac{\Phi_T}{\pi} \right)^2 \left(\frac{k_{33}}{k_{11}} - \frac{2k_{22}}{k_{11}} \left(1 - \frac{2\pi d}{p_0 \Phi_T} \right) \right) \right)}.$$

Это напряжение соответствует величине электрического поля, в котором возникает деформация ЖК в рабочей ячейке. С другой стороны, изменение оптического отклика возникает при напряжении U_{opt} , которое больше, чем U_{Fred} . Это обусловлено тем, что для регистрации изменения оптического отклика в тонких ЖК-ячейках необходимая разность фазы может быть получена только при достаточно сильных деформационных искажениях в ЖК, вызванных управляющим напряжением. Аналитическое выражение для величины напряжения оптического порога отсутствует, и это значение может быть получено только численным методом. На рис. 4 показаны зависимости напряжений U_{Fred} и U_{opt} эффекта интерференции поляризованных лучей в НМС от угла закрутки ЖК-структуры Φ_T в рабочей ЖК-ячейке для различных типов граничных условий. Если сравнить зависимости $c = c(\Phi_T)$ (рис. 2) и $U_{opt} = U_{opt}(\Phi_T)$ (рис. 4) между собой, то можно заметить их взаимную корреляцию. Коэффициент корреляции данных для параметра c и величины напряжения оптического порога U_{opt} для симметричных граничных условий составляет $r = 0,905$, а для антисимметричных граничных условий $r = 0,835$. Анализ полученных данных позволяет считать $c \approx U_{opt}$, как для симметричных и для антисимметричных граничных условий в рабочей ячейке НМС. Отметим, что в отличие от порогового напряжения перехода Фредерикса U_{Fred} , значение напряжения оптического порога U_{opt} зависит не только от физических и конструктивных параметров НМС, но и от типа электрооптического эффекта, используемого для работы ЖК-устройства. Это обусловлено тем, что для проявления того или иного электрооптического эффекта требуется различная степень деформации ЖК-структуры. Моделирование показало, что напряжение оптического порога для эффекта интерференции поляризованных лучей будет меньше напряжения оптического порога твист-эффекта. В то же время напряжение оптического порога твист-эффекта будет меньше напряжения оптического порога эффекта «гость – хозяин». При

этом все три эффекта могут наблюдаться в одной и той же ЖК-структуре с одним типом граничных условий. Из этого следует, что все три эффекта будут иметь различные времена срабатывания ЖК-устройства при одном и том же управляющем напряжении U_{on} .

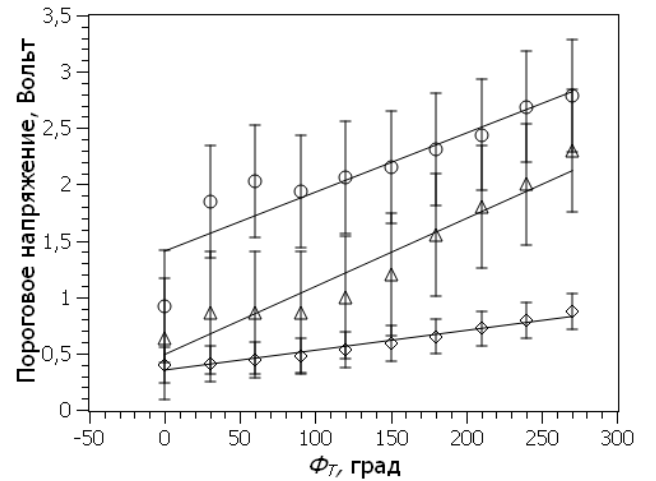


Рис. 4. Зависимость значения порогового напряжения от угла закрутки структуры ЖК:

O – напряжение оптического порога для антисимметричных граничных условий, Δ – напряжение оптического порога для симметричных граничных условий, \diamond – напряжение порога Фредерикса для нулевых симметричных граничных условий

Fig. 4. Dependence of threshold voltage value on twist angle of LC structure:

O – is optical threshold voltage for antisymmetric boundary conditions, Δ – is optical threshold voltage for symmetric boundary conditions, \diamond – voltage of Fredericksz threshold for zero symmetric boundary conditions

Таким образом, мы показали, что с погрешностью, не превышающей 15 %, зависимость полного времени срабатывания НМС от управляющего напряжения для симметричных граничных условий может быть описана следующим выражением:

$$\tau = \tau_0 \cdot (r_1 - r_2 \cdot \Phi_T) + \frac{\gamma_1 \cdot d^2}{\Delta \varepsilon} \cdot \frac{\psi(k_{11}, k_{22}, k_{33}) \cdot (s_1 + s_2 \cdot \Phi_T)}{U_{on}^2 - U_{opt}^2}. \quad (3)$$

Для антисимметричных граничных условий в рабочей ячейке НМС эта же зависимость имеет несколько другой вид:

$$\tau = \frac{\tau_0 \cdot (r_1 - r_2 \cdot \Phi_T)}{2} + \frac{\gamma_1 \cdot d^2}{\Delta\epsilon} \cdot \frac{\psi(k_{11}, k_{22}, k_{33}) \cdot (s_1 - s_2 \cdot \Phi_T)}{U_{on}^2 - U_{opt}^2} \quad (4)$$

Из этого следует, что основное различие в выражениях (3) и (4) заключается в зависимости $\tau = \tau(\Phi_T)$ от типа граничных условий, хотя общий вид выражения (2) одинаков для любого случая.

Заключение

На основе выполненных компьютерных экспериментов по динамике переключения НМС различных конструкций и типов граничных условий найдена простая аналитическая зависимость времени срабатывания НМС от управляющего напряжения для всего диапазона его изменения. Показано, что полное время срабатывания НМС произвольной конструкции при высоких значениях управляющего напряжения не зависит от его величины, а определяется только конструктивными и физическими параметрами устройства. Установлены различия в аналитических зависимостях полного времени срабатывания НМС для антисимметричных и симметричных граничных условий в рабочей ячейке ЖК. При одном и том же наборе физических и конструктивных параметров ЖК-устройства минимальное значение времени срабатывания НМС меньше у НМС с антисимметричными граничными условиями, чем у НМС с симметричными граничными условиями. При этом в ЖК-устройствах с одинаковыми физическими и технологическими параметрами при одном и том же значении управляющего напряжения время срабатывания НМС зависит от вида электрооптического эффекта, который используется в рабочей ЖК-ячейке.

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

Acknowledgment. The work was carried out within the framework of the RFBR grant № 19-07-01005.

Список источников / References

1. Ziqian He, Fangwang Gou, Ran Chen, Kun Yin, Tao Zhan, Shin-Tson Wu. Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances and future developments. *Crystals*, 2019, **9** (6), 292–300. DOI: 10.3390/cryst9060292.
2. Wang C.T., Yang C.S., Guo Q. Liquid crystal optics and physics: recent advances and prospects. *Crystals*, 2019, **9** (12), 670. DOI: 10.3390/cryst9120670.
3. Salah Obayya, Mohamed Farhat O. Hameed, Nihal F. Areed. Computational liquid crystal photonics: fundamentals, modelling and applications. Great Britain: John Wiley & Sons, 2016, 272 p.
4. 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.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7].
5. Jirón V., Castellón E. New method for analysis of electrooptical response in liquid crystal devices with non-monotonous relaxation. *Liq. Cryst.*, 2021. 1–9. DOI: 10.1080/02678292.2021.1909763.
6. Сухариев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukhariev A.S. Liquid crystal indicators. Moscow : Radio and communications, 1991, 256 p. (in Russ.).]
7. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 2018. 136 с. [Simonenko G.V. Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals. Saratov : Saratov University, 2018, 136 p. (in Russ.).]
8. Симоненко Г. В. Модулятор света на основе нематического жидкого кристалла с сверхзакрученной структурой, работающий в волноводном режиме с антисимметричными граничными условиями // *Жидк. крист. и их практич. использ.*, 2021, Т. 21, № 1. С. 81–92. [Simonenko G.V. Light modulator based on nematic liquid crystal with super-twisted structure operating in waveguide mode with antisymmetric boundary conditions. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2021, **21** (1), 81–92. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.81].
9. 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.)].
10. 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 (in Russ.)].
 11. 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.
DOI: 10.1080/10587250008023248.
 12. Chigrinov V.G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London : Artech House, 1999, 359 p.
 13. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах: дисс. ... д-ра хим. наук. Саратов: гос. ун-т, 2001. 290 с. [Kurchatkin S.P. Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes. PhD thesis (Chem.). Saratov, 2001, **1**, 290 p. (in Russ.)].
 14. 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 pre-tilt angles of liquid crystalline molecules placed on to orienting substrates on characteristics of liquid crystalline modulators based on π -cells. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 26–36 (in Russ.). **DOI:** 10.18083/LCAppl.2018.3.26].
 15. Симоненко Г. В. Быстродействующий ЖК-модулятор на основе волноводного эффекта в сверхзакрученной структуре нематика // *Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика*. 2020. № 3. С. 38–52. [Simonenko G.V. Computer analysis of the influence of technological parameters of a highspeed liquid crystal modulator on its integral characteristics. *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*. 2020, № 3, 38–52. (in Russ.). **DOI:** 10.18384/2310-7251-2020-3-38-52].
 16. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 404 с. [De Gennes P.G. The physics of liquid crystal. Moscow : Mir, 1977, 404 p. (in Russ.)].
 17. Симоненко Г. В. Оптические и динамические характеристики жидкокристаллических и биологических сред: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Саратов: гос. ун-т, 2010. 219 с. [Simonenko G.V. Optical and dynamic characteristics of liquid crystal and biological media. PhD thesis (Phys. and mathematics). Saratov, 2010, **1**, 219 p. (in Russ.)].
- Симоненко Г. В. – <https://orcid.org/0000-0002-6283-6335>
- Поступила 6.12.2021, одобрена 11.01.2022, принята 15.01.2022
Received 6.12.2021, approved 11.01.2022, accepted 15.01.2022