

05; 06

## УПРАВЛЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ КОРРЕКТОРАМИ В АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*В. А. Дорезюк, А. Ф. Наумов, В. И. Шмальгаузен*

Для жидкокristаллического корректора волнового фронта с одной степенью свободы рассматриваются четыре способа управления этим корректором: амплитудный, импульсный и два амплитудно-импульсных. Приводятся экспериментальные характеристики адаптивных интерферометров.

В адаптивных оптических системах компенсация фазовых искажений монохроматического излучения, вызванных турбулентностью среды распространения или самой оптической системой, производится, как правило, деформируемыми зеркалами [1, 2]. Применение для этого фазовых жидкокristаллических (ЖК) корректоров в ряде случаев может оказаться предпочтительнее [3]. Способы управления такими корректорами имеют свои особенности и в значительной мере определяют динамический диапазон адаптивной системы в целом.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований способов управления одним каналом ЖК корректора с электрической адресацией в системе с обратной связью. Для этого использовалась ячейка с нематическим жидким кристаллом, работающая на электрооптическом  $S$ -эффекте [4]. Технология изготовления таких ячеек подробно описана в [5].

### Амплитудное управление

Обычно требуемая величина фазовой задержки  $\Phi$  для необыкновенного светового пучка в слое ЖК достигается изменением эффективного значения напряжения  $U$ , приложенного к этому слою. Поведение  $\Phi(U, t)$  для  $U \leq 1.22 U_0$  описывается следующим выражением:

$$\Phi(U, t) = \Phi_m \left\{ 1 - \frac{1}{8} \left( \frac{n_{\parallel}^2}{n_{\perp}^2} + \frac{n_{\parallel}}{n_{\perp}} \right) (U^2 - U_0^2) \left( \frac{2}{3} U^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_{33} - K_{11}}{K_{11}} U_0^2 \right)^{-1} \left[ 1 + \operatorname{th} \left( \frac{t - \tau_0}{\tau} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $U_0 = \pi (4\pi K_{11} / \Delta\epsilon)^{1/2}$  — пороговое напряжение;  $\Phi_m = 2\pi (n_{\parallel} - n_{\perp}) L / \lambda$  — максимальная величина фазовой задержки;  $K_{11}$  — модуль упругости поперечного, а  $K_{33}$  — продольного изгиба молекул ЖК;  $\Delta\epsilon$  — диэлектрическая анизотропия;  $L$  — толщина слоя ЖК;  $n_{\parallel}$ ,  $n_{\perp}$  — показатели преломления в отсутствие напряжения на ячейке для светового пучка с поляризацией параллельной и перпендикулярной исходной ориентации молекул соответственно;  $\lambda$  — длина световой волны;  $\tau$  — время релаксации ячейки. Параметр  $\tau_0$  определяет время, необходимое для превышения тепловых флуктуаций фазовой задержки, контролируемой величиной  $\Phi$ . Амплитуда флуктуации является функцией напряжения, приложенного к ячейке,

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{2} \Phi_m \left( \frac{n_{\parallel}^2}{n_{\perp}^2} + \frac{n_{\parallel}}{n_{\perp}} \right) L^2 \frac{R_0 T}{NM} \left( \pi^2 K_{11} + \frac{\Delta\epsilon}{4\pi} U^2 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\rho$  — плотность ЖК,  $M$  — молярная масса,  $T$  — термодинамическая температура,  $N$  — число молекул в одном домене.

При  $U=0$  флуктуации максимальны; так, для  $n_1=1.74$ ,  $n_2=1.53$ ,  $K_{11}=8.5 \times 10^{-7}$  дин,  $\rho=1$  г/см<sup>3</sup>,  $N=10^8$ ,  $M=270$  г/моль,  $L=5$  мкм,  $T=293$  К —  $\langle \Phi \rangle = 0.34$  рад. С увеличением управляющего напряжения амплитуда флуктуации уменьшается, параметр  $\tau_0$  становится пренебрежимо малой величиной. Таким образом, время релаксации  $\tau$  полностью характеризует быстроедействие ячейки. Для  $U > U_0$   $\tau$  означает время «включения»  $S$ -эффекта

$$\tau_{\text{вкл}} = \tau^* L^2 / (U^2 / U_0^2 - 1), \quad (3)$$

где  $\tau^* = \gamma_1 / (\pi^2 K_{11})$ ,  $\gamma_1$  — коэффициент «вращательной» вязкости.

Если  $U \leq U_0$ , то  $\tau$  соответствует времени «выключения»

$$\tau_{\text{выкл}} = \tau^* L^2. \quad (4)$$

Для тонких ячеек ( $L=5$  мкм с типичными значениями  $\gamma_1=10-100$  сП,  $K_{11}=10^{-6}$  дин,  $U_0=1-5$  В,  $U=10-100$  В) диапазон  $\tau_{\text{вкл}}$  составляет  $25 \cdot 10^{-6} - 0.83$  с, а  $\tau_{\text{выкл}}=0.25-2.5$  с. Выбор ЖК с меньшей вязкостью с целью увеличить быстроедействие приводит к необходимости повышения управляющего напряжения. Поскольку такие кристаллы, как правило, обладают малой оптической активностью, то требуется большая степень переориентации молекул для того же изменения фазовой задержки. Этот эффект можно приблизительно охарактеризовать как «фактор реакции»  $\gamma_1 / \Delta n^2 = \text{const}$ , где  $\Delta n$  — оптическая анизотропия.

### Импульсное управление]

Значительное повышение быстроедействия достигается для ячеек, содержащих ЖК с низкочастотной инверсией знака диэлектрической анизотропии. При импульсном управлении такими ячейками для частоты управляющего напряжения ниже критической частоты  $f_0$  (причем  $U > U_0$ )  $\Delta \varepsilon > 0$  и молекулы слоя ЖК ориентируются вдоль направления управляющего поля, т. е. имеет место электрооптический  $S$ -эффект. Время  $S$ -ориентации  $\tau_S = \tau_{\text{вкл}}$  в выражении (3). Для напряжений с частотой  $f > f_0$   $\Delta \varepsilon < 0$  и молекулы ЖК ориентируются перпендикулярно полю ( $B$ -эффект). Время  $B$ -ориентации  $\tau_B$  определяется так же, как и  $\tau_S$ , но  $\tau^* = \gamma_1 / (\pi^2 K_{33})$ . Быстроедействие ячейки ограничивается величиной  $f_0$ , которая с повышением температуры возрастает (примерно вдвое на каждые 8 °С).

Таким образом, импульсный способ управления состоит в изменении соотношения времен действия на слой ЖК низкочастотного и высокочастотного напряжений в соответствии с сигналом ошибки цепи обратной связи. Так, для уменьшения фазовой задержки на величину  $\Delta \Phi$  необходимо к ячейке подключить напряжение низкой частоты на время  $t_S = \Delta \Phi / \Phi'_S$ , где  $\Phi'_S = d\Phi_S / dt$  — скорость уменьшения фазовой задержки. Чтобы увеличить фазовую задержку на ту же величину, надо подключить напряжение высокой частоты на время  $t_B = \Delta \Phi / \Phi'_B$ , где  $\Phi'_B$  — скорость увеличения фазовой задержки. Соотношение между  $t_S$  и  $t_B$  определяет состояние двулучепреломления в слое ЖК.

Экспериментально этот способ реализован для стабилизации разности оптического хода плеч (разности фаз опорного и предметного световых пучков) интерферометра Тваймана—Грина—Вильямса, устройство которого показано на рис. 1, а. В предметном плече имеется ЖК ячейка 6, ориентированная таким образом, что направление поляризации лазерного пучка и исходной ориентации слоя ЖК совпадают. В ячейке использовался жидкий кристалл ЖК-999 ( $f_0=8.5$  кГц при  $t=20$  °С) толщиной 5 мкм. Изменение разности хода вводится опорным зеркалом 4, закрепленным на пьезоэлектрическом приводе. Сигнал ошибки в цепи обратной связи (рис. 1, б) выделяется в результате сравнения напряжений с фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 10, на который проецируется небольшой участок интерференционной картины, и опорного постоянного напряжения ( $U_{\text{оп}}$ ) на компараторе К. Величина опорного напряжения задается равной напряжению сигнала с ФЭУ при выключенном пьезоприводе

зеркала. Подключение пьезопривода к генератору переменного напряжения  $11$  приводит к смещению опорного зеркала и, следовательно, к движению интерференционной картины по входному зрачку ФЭУ. Если при этом амплитуда сигнала с ФЭУ превосходит опорное напряжение, то на выходе компаратора появляется логическая единица и через элемент 2И-НЕ, соединенный с компаратором одним из своих входов, проходят импульсы высокой частоты (в эксперименте частота импульсов составляла  $18$  кГц), которые подаются на второй вход 2И-НЕ. Если амплитуда сигнала с ФЭУ меньше или равна опорному напряжению, то на выходе элемента 2И-НЕ выставляется логическая единица. Таким образом, на ячейку через транзисторный ключ и дифференцирующую  $RC$ -цепочку (чтобы предотвратить диссоциацию молекул ЖК от действия постоянного напряжения) подается напряжение высокой частоты  $U_B =$

$$= U_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \chi [t - n!(2f)]$$

( $\chi(t)$  — функция Хевисайда) или напряжение  $U_S = U_0 \times \exp(-\alpha t) (\alpha = [R(C + C_{\text{ЖК}})]^{-1})$ ,  $C_{\text{ЖК}}$  — емкость ячейки). Значения  $R$  и  $C$  выбираются таким

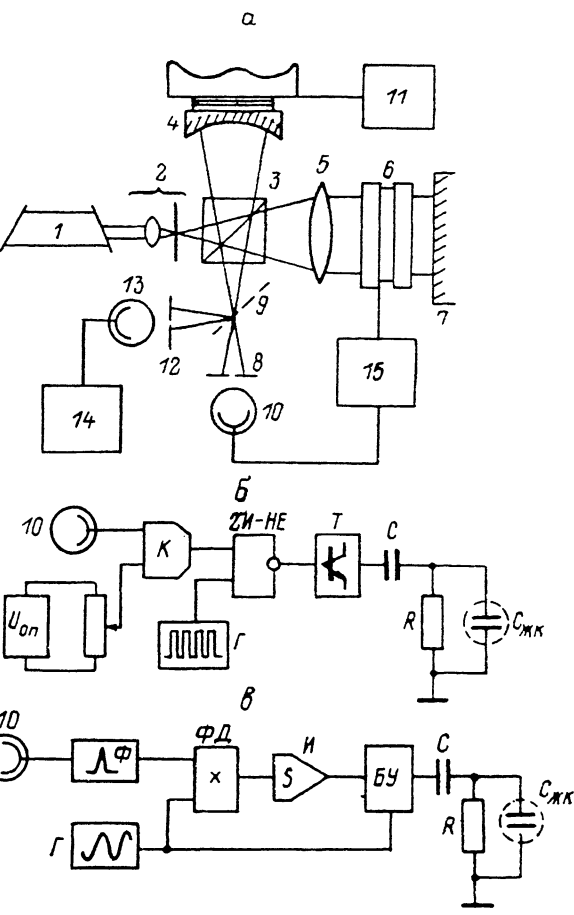


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

**а:** 1 — лазер; 2 — микробиъектив с микродиафрагмой; 3 — светоделительный кубик; 4 — опорное сферическое зеркало; 5 — коллимирующая линза; 6 — ЖК ячейка; 7 — зеркало; 8, 12 — диафрагмы; 9 — светоделительная пластина; 10, 13 — ФЭУ; 14 — спектроанализатор; 11 — генератор звуковой частоты; 15 — цепь обратной связи; **б:**  $U_{оп}$  — источник опорного напряжения, К — компаратор, Г — генератор прямоугольных импульсов, Т — транзисторный ключ; **в:** Ф — фильтр, Г — генератор синусоидального напряжения, ФД — фазовый детектор, И — интегратор, БУ — блок управления.

образом, чтобы избежать шунтирования ячейки на частоте  $f$  ( $RC_{\text{ЖК}} \ll f^{-1}$ ) и обеспечить максимальную полосу пропускания сигнала ошибки ( $C \gg C_{\text{ЖК}}$ ). Диапазон изменения  $C_{\text{ЖК}}$  находится в интервале от  $\epsilon_B^2 S / (4\pi L)$  до  $\epsilon_S^2 S / (4\pi L)$ . Например, для площади  $S = 4$  см<sup>2</sup>,  $\epsilon_B^2 = 5.2$ ,  $\epsilon_S^2 = 9.5$ ,  $L = 5$  мкм емкость ЖК ячейки изменяется от 3.7 до 6.7 нФ. В эксперименте  $R = 10$  кОм,  $C = 1$  мкФ.

В приближении  $\Phi'_S = \Phi'_B = \Phi'$  [ $K_{11} = K_{33}$ ] и без учета области нечувствительности системы разность фаз световых пучков  $\Phi(x, t)$  ( $x$  — текущая разность хода) находится из уравнения

$$\Phi + [\text{sgn}(u) - 1(u)] t_0 \Phi' = \Phi_0,$$

$$\text{sgn}(u) = \begin{cases} 1, & u > 0 \\ 0, & u = 0 \\ -1, & u < 0 \end{cases}, \quad 1(u) = \begin{cases} 1, & u = 0 \\ 0, & u \neq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\Phi_0 = \Phi(x_0)$  ( $x_0$  — заданная разность хода) — разность фаз, соответствующая величине опорного напряжения;  $u = \cos(\Phi) - \cos(\Phi_0)$ ,  $\tau \Phi'$  — чувствительность системы.

Решая это уравнение для произвольного отклонения разности фаз  $\delta$  от заданной, получаем

$$\Phi = \Phi_0 - \delta \exp \{ [\operatorname{sgn}(u) - 1(u)] t/t_0 \}. \quad (6)$$

Поскольку  $\Phi_0$  — величина периодическая, то для произвольного направления изменения разности фаз придем к одному из значений  $\Phi_0$ . Вблизи этого значения разность фаз  $\Phi(x, t)$  будет осциллировать с периодом  $2t_0$  и амплитудой  $t_0\Phi'$ . В эксперименте период осцилляций составлял 0.52 мс, а амплитуда 0.09 рад ( $\lambda = 0.633$  мкм).

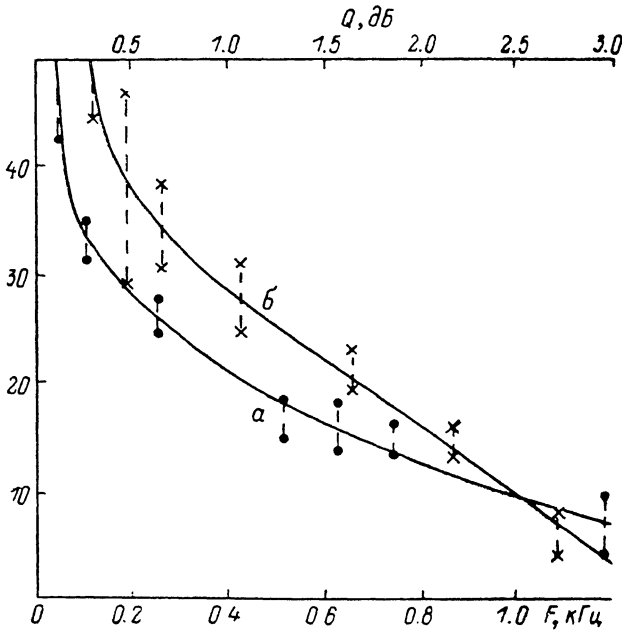


Рис. 2.

Степень подавления внешних воздействий на разность хода стабилизированного интерферометра характеризует эффективность его работы. Количественной величиной эффективности может служить коэффициент депрессии

$$Q = 20 \lg (U_+ / U_-), \quad (7)$$

где  $U_-$  и  $U_+$  — амплитуды сигналов с дополнительного ФЭУ 13 (рис. 1, а) при разомкнутом и замкнутом контурах обратной связи соответственно. Измерения выполнялись с помощью спектроанализатора 14 на частоте колебаний опорного зеркала. На рис. 2 показаны основные характеристики системы с импульсным управлением: зависимость коэффициента депрессии от частоты колебаний зеркала при постоянной амплитуде  $0.62\pi$  (кривая а) и от глубины фазовой модуляции на частоте 210 Гц (кривая б).

### Амплитудно-импульсное управление

Для адаптивных оптических систем, работающих по принципу апертурного зондирования, характерны наличие малых высокочастотных пробных возмущений волнового фронта и значительный диапазон управления фазой светового пучка в частотной области флуктуаций фазы. Для ЖК корректоров высокочастотная модуляция фазовой задержки производится от периодической последовательности импульсов низкой и высокой частоты, а глобальное управление фазовой задержкой — изменением амплитуды этих импульсов (рис. 3).

На рис. 1, в показана функциональная схема контура обратной связи для одного канала управления. Эта схема использовалась, как и в предыдущем случае, для стабилизации разности хода в интерферометре. Рассмотрим работу си-

стемы. Периодическая последовательность импульсов низкой и высокой частоты формируется блоком управления ЖК ячейкой БУ с помощью генератора синусоидального напряжения  $U$ , настроенного на частоту  $\omega = 2\pi/(t_s - t_L)$ . Эта частота выбирается достаточно высокой:  $\omega \ll \tau^{-1}$ , поэтому глубина модуляции фазовой задержки светового пучка  $a \ll \pi$ . При условии что диафрагма  $S$  (рис. 1, а) перед ФЭУ 10 устанавливается на границе свет-тень интерференционной

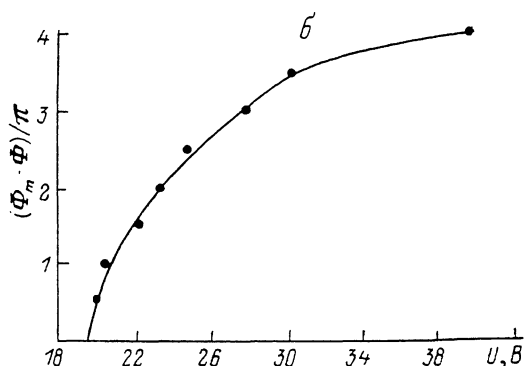
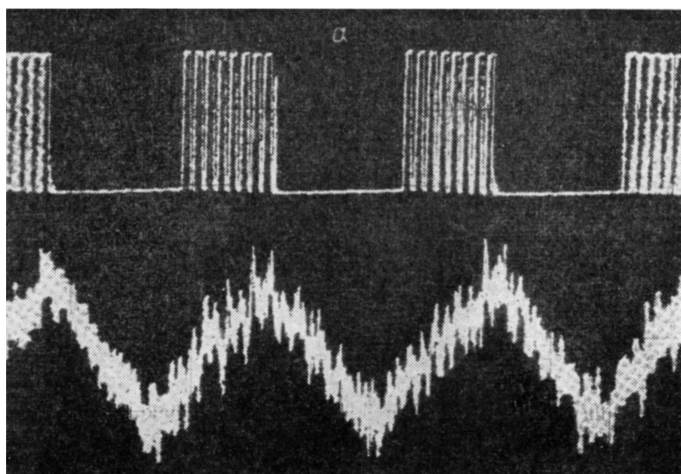


Рис. 3. Амплитудно-импульсное управление.

а — осциллограмма управляющего напряжения (сверху) и соответствующая этому напряжению высокочастотная модуляция фазовой задержки (снизу); б — зависимость постоянной составляющей фазовой задержки от амплитуды управляющего напряжения.

картины, частота первой гармоники фототока совпадает с частотой  $\omega$ . Амплитуда первой гармоники после фильтра  $\Phi$ , настроенного на ту же частоту, равна

$$U_\Phi = -2\kappa I_0 \sin(\delta) J_1(a) \sin(\omega t), \quad (8)$$

где  $\kappa$  — коэффициент преобразования ФЭУ,  $I_0$  — максимальная интенсивность в интерференционной картине,  $J_1(a)$  — функция Бесселя 1-го рода. На фазовом детекторе  $\Phi Д$  производится умножение напряжения  $U_\Phi$  на опорное напряжение с генератора  $U$ , и фильтрация низкой частоты

$$U_{\Phi Д} = -\kappa I_0 J_1(a) \sin(\delta). \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что напряжение  $U_{\Phi Д}$  может служить сигналом рассогласования разности фаз  $\delta = \Phi - \Phi_0$ . Повышение астатизма системы достигается введением в цепь обратной связи интегратора  $I$ . После интегратора сигнал ошибки

$$U_I = -\frac{h}{T_I} \kappa I_0 J_1(a) \int \sin(\delta) dt, \quad (10)$$

( $T_{II}$ ) — постоянная времени интегратора,  $h$  — его коэффициент усиления) подается на блок управления БУ. Например, для вносимого опорным зеркалом изменения разности фаз  $\delta = A \sin(\Omega t)$ , где  $A < \pi$ ,  $\Omega$  — частота колебаний зеркала, в первом приближении

$$U_{II} = \frac{U(A)}{T_{II}\Omega} \cos(\Omega t), \quad (11)$$

где  $U(A) = 2\kappa h I_0 J_1(a) J_1(A)$ .

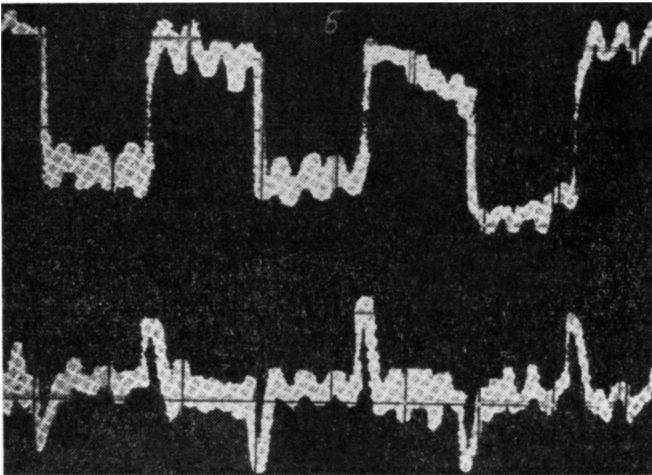
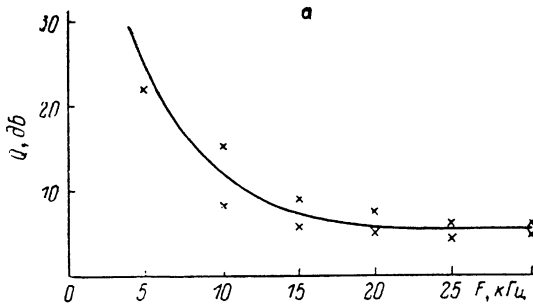


Рис. 4. Характеристики системы с амплитудно-импульсным управлением.

$a$  — зависимость коэффициента депрессии от частоты синусоидальных колебаний опорного зеркала при амплитуде колебаний  $2.5 \pi$ ;  $b$  — осциллограмма, полученная с ФЭУ (рис. 1, а, 13) при разомкнутой цепи обратной связи (сверху) и замкнутой цепи обратной связи (снизу), частота колебаний зеркала 12 Гц.

Блок управления ЖК ячейкой осуществляет модуляцию амплитуды периодической последовательности импульсов высокой и низкой частот

$$U_{БУ} = (U_m - \beta U_{II}) s(t), \quad (12)$$

где  $U_m$  — максимальная амплитуда импульсного напряжения на ЖК ячейке,  $\beta$  — коэффициент усиления БУ,

$$s(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \chi[t - i/(2f)] \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \chi(t - j\pi/\omega) \quad (13)$$

— сигнал, производящий высокочастотную модуляцию фазовой задержки.

При низкочастотных колебаниях опорного зеркала  $\Omega \ll \alpha$  напряжение после дифференцирующей цепочки изменяется в противофазе к  $\delta$

$$U_{ЖК} = \left[ U_m \exp(-\alpha t) - \beta \frac{U(A)}{T_{II}(\Omega^2 + \alpha^2)^{1/2}} \sin(\Omega t - \theta) \right] s(t), \quad (14)$$

$\theta = \arctg(\Omega/\alpha)$ .

Опережение фазы сигнала ошибки проявляется лишь на высоких частотах. Это приводит к повышению устойчивости системы [6], но к уменьшению коэффициента депрессии.

В экспериментальной установке использовалась та же ЖК ячейка, что и в схеме с импульсным управлением. Частота  $f$  составляла 18 кГц, а  $\omega/2\pi = 1$  кГц. Фильтр  $\Phi$  был настроен на частоту 1 кГц и имел полосу пропускания  $\pm 100$  Гц. Постоянная времени интегратора была выбрана 0.56 мс при чувствительности цепи обратной связи  $2B/\pi$  (без учета усиления БУ). На рис. 4 представлены зависимость коэффициента депрессии от частоты синусоидальных колебаний опорного зеркала при амплитуде колебаний  $A = 2.5\pi$  (а) и осциллограммы работы системы при импульсном изменении разности фаз  $\delta$  (б).

Следует отметить, что управление фазовой задержкой может быть получено изменением соот-

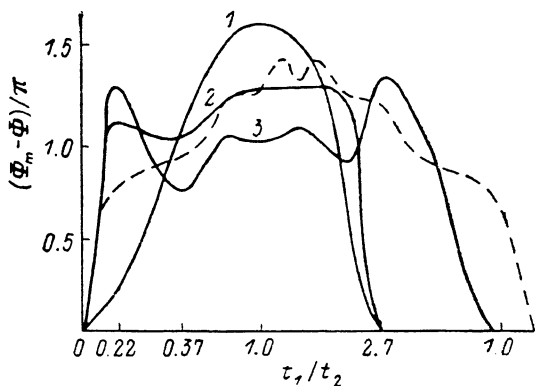


Рис. 5. Зависимость электрооптического отклика слоя ЖК от  $t_s/t_B$ .

U, В: 1 — 30, 2 — 50, 3 — 70. Штриховая линия — зависимость действующего значения первых четырех гармоник управляющего напряжения.

ношения  $t_s/t_B$  в периодической последовательности импульсов питающего напряжения при постоянной амплитуде и периоде  $T_\omega = t_s + t_B$ . Это соответствует изменению амплитуд низкочастотных гармонических составляющих, которые дают основной вклад в состояние двулучепреломления слоя ЖК. Так, для коэффициентов разложения в ряд Фурье управляющего напряжения единичной амплитуды  $s(t)$ , описанного выражением (13),

$$\alpha_n = \frac{\sin(n\pi t_B/T_\omega)}{\pi} \left\{ \frac{(-1)^{[t_B f]}}{(T_\omega f)^2 - n^2} [T_\omega f \sin(\pi t_B) \operatorname{ctg}(\pi n t_B / T_\omega) - n \cos(\pi t_B)] - 1/n \right\},$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

где  $[t_B f]$  — целая часть числа.

На рис. 5 показаны зависимость действующего значения первых четырех гармоник  $\left(\sum_{n=1}^4 \alpha_n^2\right)^{1/2}$  и экспериментальные зависимости электрооптического отклика слоя ЖК от  $t_s/t_B$ . При расчете и в эксперименте период  $T_\omega = 1$  мс, частота  $f = 12$  кГц.

### Заключение

Рассмотренные способы управления ЖК корректором с одной степенью свободы могут быть использованы для адаптивных оптических систем с большим числом каналов управления. С целью получения наибольшего быстродействия таких систем следует использовать импульсный способ управления.

Важным достоинством адаптивных систем с импульсным и амплитудно-импульсным управлением (в случае вариации  $t_s/t_B$ ) является отсутствие аналоговых усилителей, что в значительной степени повышает надежность и снижает стоимость систем.

### Список литературы

- [1] Freeman R. H., Pearson J. E. // Appl. Opt. 1982. Vol. 21. N 4. P. 580—588.
- [2] Тараненко В. Г., Горозов Ю. Г., Романюк Н. С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 8. С. 49—43.
- [3] Васильев А. А., Наумов А. Ф., Шмальгаузен В. И. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 4. С. 724—728.
- [4] Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
- [5] Карасева И. А. и др. // Опт.-мех. пром. 1975. № 10. С. 47—52.
- [6] Хэммонд П. Теория обратной связи и ее применения. М.: ГИФМЛ, 1961. 423 с.