

Регистрация импульсных токов волоконно-оптическим датчиком на основе эффекта Фарадея с ограниченной частотной полосой

В.П.Губин, Н.И.Старостин, Я.В.Пржиялковский, С.К.Моршнев, А.И.Сазонов

Экспериментально и теоретически изучена зависимость амплитудных и шумовых параметров отклика волоконно-оптического датчика тока на основе эффекта Фарадея от частотной полосы фотоприемника при регистрации прямоугольных импульсов тока длительностью не более времени распространения света по чувствительному волокну. Продемонстрировано наличие оптимальной полосы, при которой отношение сигнал/шум имеет выраженный максимум. Показано, что оптимальная полоса близка по величине обратному времени прохода света по волокну. Обнаруженная особенность объясняется различными зависимостями амплитуды отклика и уровня белого шума оптического излучения от частотной полосы фотоприемника. Предложена методика коррекции амплитудной погрешности при оптимальной полосе.

Ключевые слова: эффект Фарадея, волоконно-оптический датчик тока, полоса фоторегистрации, отношение сигнал/шум.

1. Введение

Интерес к применению интерферометрических волоконно-оптических датчиков электрического тока (ВОДТ) на основе эффекта Фарадея [1–4] для измерения импульсных токов малой длительности [5–7] обусловлен малой инерционностью эффекта (~ 1 нс) и практическими преимуществами этих датчиков. В частности, ВОДТ не требуют разрыва токопровода с измеряемым током, удобны в монтаже и эксплуатации, их чувствительные элементы могут располагаться на удаленных и опасных объектах.

Принцип работы ВОДТ основан на индуцировании магнитным полем тока фазового сдвига Фарадея между ортогональными циркулярно поляризованными световыми волнами в оптическом чувствительном волокне, намотанном вокруг токопровода. Интерференция этих волн на выходе оптической схемы ВОДТ преобразует фазовый сдвиг в изменение интенсивности излучения, регистрируемой фотоприемником. В результате на выходе фотоприемника формируется отклик на измеряемый ток.

Форма отклика таких волоконно-оптических датчиков на прямоугольный импульс тока представляет собой равнобокую трапецию [7]. Подобная форма имеет место в случае достаточно широкой полосы фоторегистрации, сравнимой с шириной спектра измеряемого импульса и, по меньшей мере, существенно превышающей обратное время распространения света по волоконному контуру (пролетный эффект). С другой стороны, при широкой полосе фоторегистрации, необходимой для регистрации коротких импульсов тока, значительно возрастает уровень

шума света, присущего оптическим датчикам, что ограничивает регистрацию токовых импульсов малой амплитуды. Шум в датчиках, использующих низкокогерентное оптическое излучение суперлюминесцентных источников света, представлен двумя компонентами [8]: фотонным (дробовым) шумом, обусловленным дискретным характером света, и избыточным шумом, возникающим вследствие биений компонент широкополосного света. Обе эти составляющие приводят к шуму интенсивности света, имеющему равномерную спектральную плотность (белый шум). При увеличении мощности излучения на фотодетекторе (от нескольких мкВт) основной вклад в указанный шум вносит избыточный шум низкокогерентного излучения, величина которого растет пропорционально мощности излучения на фотодетекторе. Поэтому при регистрации импульсов тока в этих условиях поиск путей повышения отношения сигнал/шум актуален. Одним из вариантов решения является сужение полосы фоторегистрации (оптимальная полоса). Учитывая, что при сужении полосы форма отклика искажается и снижается его максимальная величина, критериями выбора может служить получение максимального отношения сигнал/шум и допустимой величины ошибки измерения амплитуды.

В настоящей работе изучается отклик ВОДТ на прямоугольный импульс тока в большом диапазоне значений полосы фоторегистрации (фотоприемника). Основное внимание уделяется регистрации импульсов, длительность которых не превышает времени пролета света по чувствительному волокну. Обоснование критериев выбора полосы датчика тока при регистрации таких импульсов является целью настоящей работы.

2. Расчетная часть

Основной элемент ВОДТ на основе эффекта Фарадея – чувствительный волоконный контур, состоящий из одного или нескольких витков магнитоиндуцируемого волокна и охватывающий проводник с измеряемым током

В.П.Губин, Н.И.Старостин, Я.В.Пржиялковский, С.К.Моршнев, А.И.Сазонов. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, просп. Введенского, 1; e-mail: nistar53@mail.ru

Поступила в редакцию 22 марта 2019 г., после доработки – 22 мая 2019 г.

[1–4]. Оптическая схема датчика может быть проходной или отражательной. В первом случае на входе и выходе чувствительного контура устанавливают поляризатор и анализатор соответственно. Во втором случае используют один поляризатор на входе контура, а на выходе контура устанавливают отражатель. Обе оптические схемы можно использовать в быстродействующих датчиках тока. Одним из главных факторов, который накладывает ограничение на быстродействие датчика, приводящее к искажению формы отклика, является время прохода излучения по контуру (пролетный эффект) [5–7]. Другим фактором может быть полоса пропускания электронной системы обработки сигнала, в частности полоса фотоприемника.

Далее рассмотрим регистрацию импульсов тока прямоугольной формы [7]. Интенсивность излучения на выходе оптической схемы датчика (отклик датчика) будет повторять фарадеевский фазовый сдвиг между ортогонально-поляризованными световыми волнами, индуцированный измеряемым током.

Пусть прямоугольный импульс тока с амплитудой I_0 имеет длительность T_c , а время распространения света по чувствительному волоконному контуру равно T_t . При полосе фоторегистрации, существенно превышающей $1/T_t$, формы отклика $H(t), h(t)$ на прямоугольный импульс тока с амплитудой I_0 имеют вид, представленный на рис.1 [7]. Подчеркнем, что в этом случае форма отклика определяется только пролетным эффектом. Для примера были взяты следующие параметры: $T_t = 1$ мкс, $T_c = 1.5, 1.0$ и 0.5 мкс. Отклик имеет вид равнобокой трапеции, параметры которой зависят от соотношения между T_c и T_t (равнобедренный треугольник является частным случаем трапеции). Высота трапеции (амплитуда отклика) H_0 при $T_c \geq T_t$ соответствует фарадеевскому фазовому сдвигу $\Delta\varphi_F$ при постоянном токе, равном I_0 :

$$\Delta\varphi_F = H_0 = aVSN_1N_2I_0, \tag{1}$$

где $a = 2(4)$ для проходной (отражательной) оптической схемы; $V = 7 \times 10^{-7}$ А/Вт – постоянная Верде для плавяного кварца; $S \approx 1$ – относительная магнитооптическая чувствительность волокна в контуре; N_1 – число витков волокна в контуре; N_2 – число витков провода с измеряемым током, проходящих через плоскость контура.

При обратном соотношении ($T_c < T_t$) амплитуда отклика $h(t)$ при сохранении трапецидальной формы снижается до величины h_0 (см. рис.1) [7]:

$$h_0 = H_0T_c/T_t. \tag{2}$$

Передний и задний фронты трапеции являются линейными функциями с крутизной, пропорциональной амплитуде тока. Их длительность не превышает времени пролета. Переход к плоской вершине является резким, без процесса плавного установления.

Из формулы (2) следует, что в случае $T_c < T_t$, можно определить истинную максимальную величину импульса тока, пропорциональную H_0 , если известна длительность импульса тока T_c :

$$H_0 = h_0T_t/T_c. \tag{3}$$

Следует отметить, что выражение (3) справедливо для прямоугольного импульса тока, однако, как показано в [6], для импульса произвольной формы можно также получить расчетное соотношение для H_0 , если известна амплитуда h_0 и длительность импульса.

2.1. Методика расчета формы отклика на прямоугольный импульс с учетом полосы фоторегистрации

Как следует из вышесказанного, сигнал на выходе фотоприемника $U_s(t)$ (импульсное напряжение отклика) при достаточно широкой (теоретически бесконечной) полосе фотоприемника имеет форму, аналогичную показанной на рис.1. Предполагается, что фотоприемник, детектирующий свет, включает в себя малоинерционный фотодиод, микросхему, преобразующую фототок в напряжение, и фильтр низких частот с одним полюсом (интегрирующая RC-цепь), который имеет постоянную времени $T_{ph} = R_{ph}C_{ph}$ (R_{ph} – нагрузочный резистор, C_{ph} – шунтирующий конденсатор). В этом случае полоса частот фотоприемника $\Delta F = 1/(2\pi R_{ph}C_{ph})$. Выходной сигнал $U_s(t)$ формируется на выходе фильтра низких частот.

Рассмотрим влияние постоянной времени фотоприемника T_{ph} на форму выходного сигнала (отклика датчика), если длительность импульсов тока $T_c \leq T_t$. Именно в случае коротких импульсов важно повышать отношение сигнал/шум, сужая полосу фотоприемника.

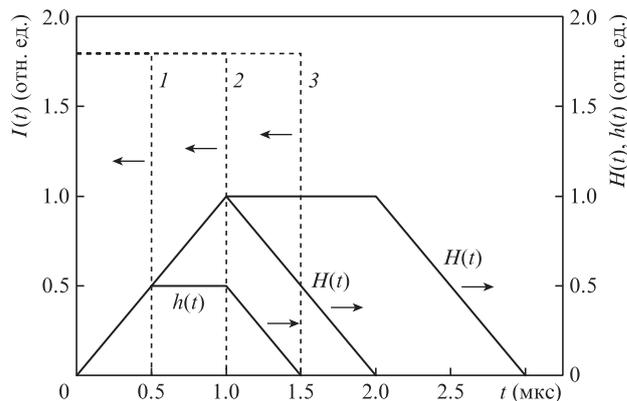


Рис.1. Теоретическая форма откликов $H(t)$ и $h(t)$ для различных длительностей импульса тока $I(t)$ при бесконечно широкой полосе фотоприемника ($T_{ph} = 0$): $T_c = 0.5$ (1), 1 (2) и 1.5 мкс (3). Отклик $h(t)$ соответствует $T_c = 0.5$ мкс, отклики $H(t)$ – 1 и 1.5 мкс. Время пролета $T_t = 1$ мкс.

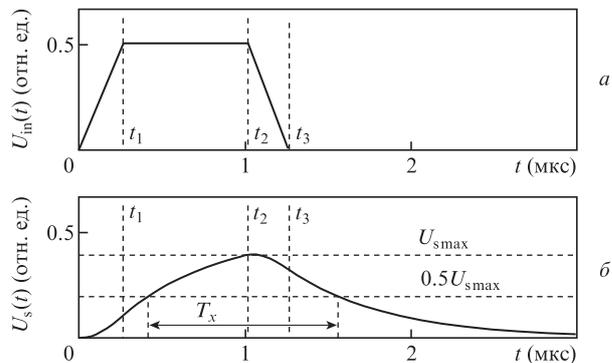


Рис.2. Отклик датчика тока на прямоугольный токовый импульс: а – напряжение на входе RC-фильтра; б – напряжение на выходе RC-фильтра. $T_c = 0.25$ мкс, $T_t = 1$ мкс, $T_{ph} = 0.6$ мкс.

На рис.2 показан рассчитанный отклик на короткий импульс тока с параметрами $T_c = 0.25$ мкс, $T_{ph} = 0.6$ мкс, $T_t = 1$ мкс. Методика расчета формы отклика при $T_c \leq T_t$ приведена ниже. Выражение для формы отклика является решением дифференциального уравнения первого порядка для напряжения $U_s(t)$ на выходе фильтра низких частот при входном напряжении $U_{in}(t)$:

$$T_{ph} dU_s(t)/dt + U_s(t) = U_{in}(t). \quad (4)$$

Решение для входного сигнала $U_{in}(t)$ в виде трапеции описывается соотношениями

$$U_{in}(t) = kt, \quad U_s(t) = kt - kT_{ph}(1 - \exp(-t/T_{ph})), \quad 0 < t < t_1, \quad (5)$$

$$U_{in}(t) = h_0, \quad U_s(t) = h_0(1 - \exp(-t/T_{ph})) - C_1 \exp(-t/T_{ph}), \quad t_1 < t < t_2, \quad (6)$$

$$U_{in}(t) = A - kt, \quad U_s(t) = A - kt + kT_{ph}(1 - \exp(-t/T_{ph})) - C_2 \exp(-t/T_{ph}), \quad t_2 < t < t_3, \quad (7)$$

$$U_{in}(t) = 0, \quad U_s(t) = C_3 \exp(-t/T_{ph}), \quad t > t_3, \quad (8)$$

где C_i – постоянные интегрирования (подбираются для «сшивки» сегментов); h_0 – вершина трапеции (в данном примере $h_0 = 0.5$); k – скорость нарастания (спада) входного сигнала (здесь $k = 2$ мкс⁻¹); A – постоянная ($A = 2.5$). Из (5)–(8) определяем амплитуду отклика U_{smax} и длительность на полувысоте T_x (см. рис.2). В нашем случае максимальное напряжение выходного сигнала $U_{smax} = 0.388$ при напряжении на входе $h_0 = 0.5$, длительность выходного сигнала на полувысоте $T_x = 1.143$ мкс.

Как уже упоминалось, с увеличением T_{ph} возникает амплитудная ошибка определения максимума импульса тока, равная ~ 0.3 при $T_{ph}/T_t \approx 0.6$. Амплитудная ошибка является систематической и может быть учтена или исключена при обработке сигнала с вычислением площади отклика.

Интегрируя (4) по времени, получаем

$$T_{ph} U_s(t) \Big|_{-\infty}^{+\infty} + \int U_s(t) dt = \int U_{in}(t) dt = Q. \quad (9)$$

Функция $U_s(t)$ в (9) – ограниченная функция, т.е. $U_s(t \rightarrow +\infty) \rightarrow 0$. Поэтому в случае ограниченной функции отклика первый член в (9) обращается в нуль, площадь Q под кривой отклика $U_s(t)$ (см. рис.2) не зависит от постоянной времени фотоприемника и равна площади трапеции (отклик ВОДТ при бесконечной полосе фотоприемника, см. рис.1):

$$Q = \int_0^{\infty} H(t) dt = H_0 T_c, \quad T_c \geq T_t, \quad (10)$$

$$Q = \int_0^{\infty} h(t) dt = h_0 T_t = H_0 T_c, \quad T_c < T_t. \quad (11)$$

Учитывая, что согласно (10) и (11) площадь трапеции (отклик ВОДТ при бесконечной полосе фотоприемника) выражается через T_c и T_t , можно утверждать, что независимость площади под кривой отклика от T_{ph} справедлива для любых возможных соотношений T_c и T_t .

Таким образом, вычислив Q согласно (11), можно восстановить истинную величину H_0 . Отметим, что для случая $T_c > T_t$ данная процедура с использованием (10) также применима.

2.2. Расчет формы и параметров отклика

Рассчитаем по вышеприведенной методике форму отклика для диапазона постоянной времени фотоприемника $T_{ph} = 0.1$ – 1.5 мкс. Длительность импульса тока T_c выбрана в пределах произвольного диапазона 0.25 – 1.0 мкс, для которого выполняется условие $T_c \leq T_t$. На рис.3 показана форма тока $I(t)$ и отклика $U_s(t)$ для $T_c = 1$ мкс (рис.3,а) и $T_c = 0.25$ мкс (рис.3,б) при различных значениях постоянной времени фотоприемника T_{ph} . Пролетное время в этих случаях $T_t = 1$ мкс. Видно, что с увеличением T_{ph} максимальное значение U_{smax} отклика снижается, а его длительность T_x на половинном уровне увеличивается.

Далее рассмотрим зависимости параметров отклика U_{smax} и T_x от постоянной времени T_{ph} фотоприемника, отнесенной к времени пролета (T_{ph}/T_t). Эти параметры будем представлять в нормированном виде, принимая за единицу значение параметра при малой постоянной времени $T_{ph} = 0.1$ мкс. На рис.4 показаны зависимости нормированных параметров отклика U_s и T_x от нормированной постоянной времени T_{ph}/T_t фотоприемника при различных длительностях импульса тока T_c/T_t .

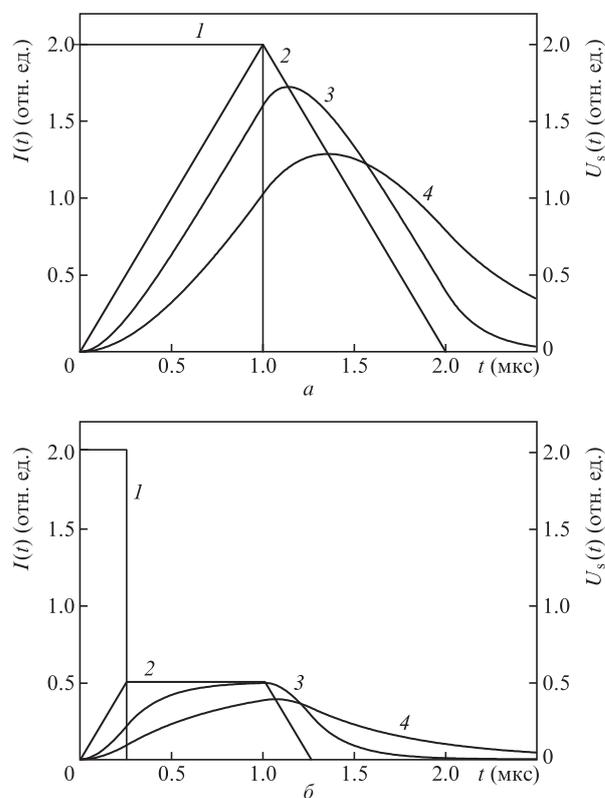


Рис.3. Расчетный отклик ВОДТ $U_s(t)$ на импульсы тока $I(t)$ (I) длительностью $T_c = 1$ мкс (а) и 0.25 мкс (б) при $T_{ph} = 0$ (2), 0.2 (3) и 0.6 мкс (4).

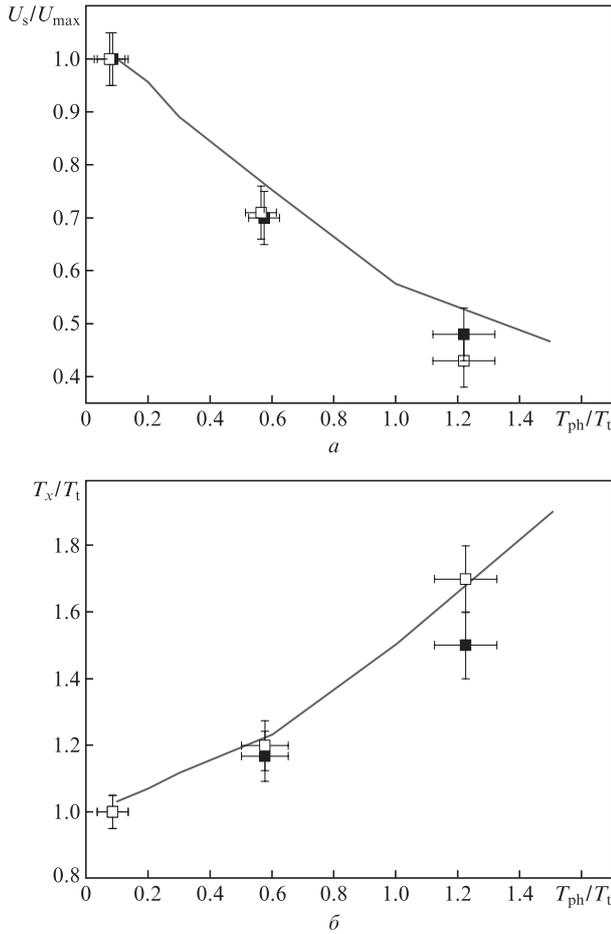


Рис.4. Расчетные (сплошные кривые) и экспериментальные (точки) зависимости нормированных параметров отклика U_s (а) и T_x (б) от нормированной постоянной времени T_{ph}/T_t фотоприемника при длительностях импульса тока $T_c/T_t = 1.0$ (■) и 0.25 (□). При расчете $T_c/T_t = 0.25-1.0$.

2.3. Анализ отношения сигнала к шуму

Как было отмечено во Введении, шумы оптического датчика тока определяются фотонным (дробовым) шумом и шумом спектральных биений широкополосного источника света (избыточным шумом) [8]. Эти шумы имеют равномерную спектральную плотность (белый шум) в пределах рабочей полосы частот датчика и являются аддитивными, суммируясь с рабочим сигналом. Они снижают точность измерения токовых импульсов малой амплитуды и ограничивают обнаружительную способность датчика (пороговую чувствительность).

Расчетное среднеквадратичное значение напряжения шума на выходе фотоприемника определяется соотношением

$$U_n = \{B[2ePqR_{ph}^2 + (PqR_{ph}\lambda)^2/(c\Delta\lambda)] + 4kTR_{ph}\}^{1/2}. \quad (12)$$

Здесь первый член описывает фотонный шум U_{nsh} , второй член – избыточный шум света U_{nex} , а третий – тепловой шум резистора фотоприемника U_{nth} , который превышал шум микросхемы фотоприемника. Шумовая полоса B фильтра для RC-цепи определяется как $B = (\pi/2)\Delta F$. Для расчетов взяты следующие параметры: $R_{ph} = 12.5$ кОм, $\Delta F = 1.8$ МГц, e – заряд электрона, $P = 30$ мкВт – мощность света на фотодиоде, $q = 1$ А/Вт – квантовая эффек-

тивность фотодиода, $\lambda = 1550$ нм – средняя длина волны источника света, $\Delta\lambda = 20$ нм – ширина спектра источника света, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, $T = 290$ К – температура. Расчет по формуле (12) дает $U_n = 0.32$ мВ, $U_{nex} = 0.32$ мВ, $U_{nsh} = 0.05$ мВ, $U_{nth} = 0.02$ мВ. Поэтому будем учитывать только избыточный шум в (12) ввиду его определяющего вклада.

Рассчитаем отношение сигнал/шум в зависимости от постоянной времени фотоприемника T_{ph} . В качестве сигнала U_s датчика импульсных токов целесообразно выбрать максимальное значение выходного сигнала фотоприемника U_{smax} (см. рис.2), которое, как отмечалось выше, пропорционально H_0 или h_0 (амплитуде отклика при $T_{ph} = 0$). Для представления U_{smax} в зависимости от параметров датчика используем выходную характеристику интерферометра в виде, описанном в работе [9]:

$$U_s = U_0[1 + K\cos(\Delta\varphi_F + \pi/2 + G)], \quad (13)$$

где $U_0 = PqR_{ph}$ – среднее напряжение на выходе фотоприемника; K – контраст (видность) интерферометра; G – сдвиг рабочей точки относительно $\pi/2$.

В случае малых сдвигов ($\Delta\varphi_F \ll 1$) и при условии $G \ll 1$, а также учитывая снижение отклика из-за влияния фильтра нижних частот, получаем на основе (13) выражение для сигнала:

$$U_{smax} = k_{ph}PqR_{ph}K\Delta\varphi_F, \quad (14)$$

где $k_{ph} = U_{smax}/U_{maxnorm} \leq 1$ – коэффициент, учитывающий снижение амплитуды отклика на выходе фильтра низких частот с ростом постоянной времени T_{ph} , определяемый по зависимости на рис.4,а.

Тогда отношение сигнала к шуму $r = U_{smax}/U_n$ как функция постоянной времени фотоприемника с учетом (14), (12) и (1) имеет вид

$$r = \alpha k_{ph}[(\pi/2)\Delta F]^{-1/2}, \quad (15)$$

где $\alpha = K\Delta\varphi_F(c\Delta\lambda)^{1/2}/\lambda$. В рамках нашей задачи α является постоянной величиной.

Отношение сигнала к шуму целесообразно представлять в относительных единицах и в нормированном виде,

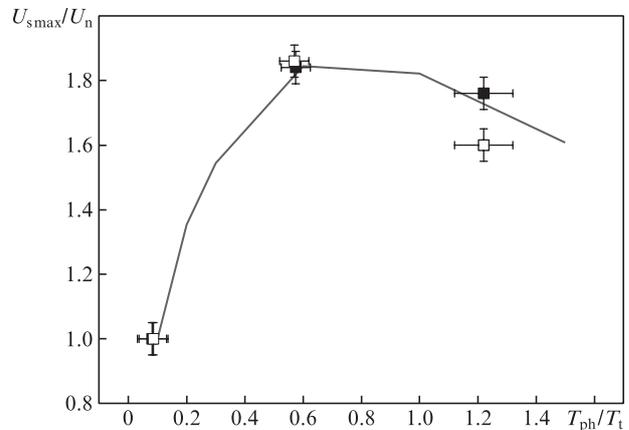


Рис.5. Расчетная (сплошная кривая) и экспериментальные (точки) зависимости нормированного отношения сигнал/шум от нормированной постоянной времени T_{ph}/T_t фотоприемника при длительностях импульса тока $T_c/T_t = 1.0$ (■) и 0.25 (□). При расчете $T_c/T_t = 0.25-1.0$.

поскольку нас интересует вид функции $r(T_{ph}/T_t)$ (рис.5). За единицу (для нормировки) принято значение r при $T_{ph}/T_t = 0.1$. Видно, что отношение сигнал/шум имеет максимум при $T_{ph}/T_t \approx 0.6$. Существование максимума в зависимости $r(T_{ph}/T_t)$ в области коротких импульсов $T_c/T_t \leq 1$ обусловлено тем, что функции сигнала $U_{smax}(T_{ph}/T_t)$ и шума $U_n(T_{ph}/T_t)$ монотонно убывают с ростом T_{ph} , однако скорость их изменения по-разному зависит от T_{ph} . Так, сигнал сначала изменяется медленно, затем начинает спадать почти линейно, тогда как шум во всей указанной области уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{T_{ph}}$. Такое поведение функций приводит к появлению максимума их отношения при $T_{ph,opt} \approx 0.6T_t$. Величина $T_{ph,opt}$ не случайно близка к пролетному времени T_t датчика (определяемому длиной волокна чувствительного контура), поскольку в этой области значений T_{ph}/T_t уже установился линейный спад сигнала с ростом T_{ph}/T_t (см. рис.4,а).

3. Эксперимент

Функциональная схема экспериментальной установки показана на рис.6. Установка представляет собой отражательный низкокогерентный волоконный интерферометр с регистрацией фазового сдвига Фарадея, индуцированного измеряемым током, без использования вспомогательной фазовой модуляции света. Интерферометр включает в себя суперлюминесцентный волоконный источник излучения 1 с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра 20 нм, направленный ответвитель 2, волоконный поляризатор 3, дискретный фарадеевский ротатор 4, соединительную линию 5, чувствительный волоконный контур 6 с френелевским зеркалом на конце. Элементы 5 и 6 выполнены из spon-волокна с длиной биений встроенного линейного двулучепреломления $L_b = 10$ мм и шагом спирали $L_{sp} = 3$ мм. Рабочая точка интерферометра определялась постоянным фазовым сдвигом 90° , который создавался ротатором 4. Выходной сигнал интерферометра детектировался фотодиодом 8, подключенным к входу трансимпедансного каскада 9. Чувствительный контур 6 представлял собой многovitковый контур из spon-волокна (число витков $N_1 = 2000$), намотанного на оправку с начальным диаметром намотки 14 мм. Расчетное время двойного прохода света для этого контура $T_t = 1100$ нс.

Выходной сигнал датчика, пропорциональный фарадеевскому сдвигу $\Delta\varphi_F$, снимался с выхода трансимпеданс-

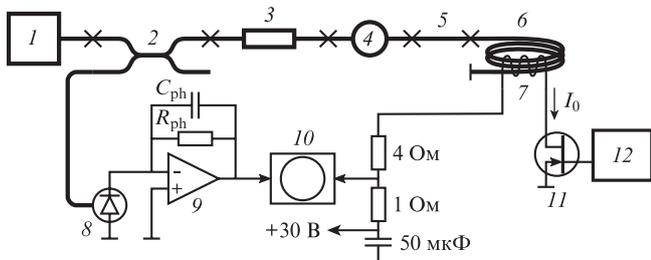


Рис.6. Схема экспериментальной установки:

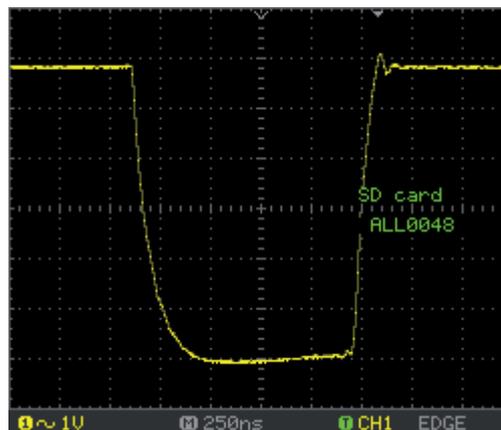
1 – источник излучения; 2 – направленный ответвитель; 3 – поляризатор; 4 – фарадеевский дискретный ротатор; 5 – соединительная линия; 6 – чувствительный контур; 7 – соленоид; 8 – фотодиод; 9 – фотоприемник с изменяемой полосой пропускания; R_{ph} – резистор; C_{ph} – конденсатор для подбора полосы пропускания; 10 – двухлучевой осциллограф; 11 – усилитель импульсного тока; 12 – задающий генератор импульсов.

ного каскада 9 (фотоприемника) с полосой пропускания, определяемой нагрузочными элементами R_{ph} и C_{ph} , и регистрировался на экране осциллографа 10. Линеаризация характеристики интерферометра не проводилась, поскольку сигналы соответствовали малым $\Delta\varphi_F$ (около 0.2 рад). Для контроля амплитудных искажений отклика проводилось сравнение амплитуды импульсных сигналов с сигналом от постоянного тока. Измеренная максимальная полоса фотоприемника $\Delta F = 1.8$ МГц при сопротивлении резистора $R_{ph} = 12.5$ кОм (минимальная постоянная времени $T_{ph} = 1/(2\pi\Delta F) = 88$ нс).

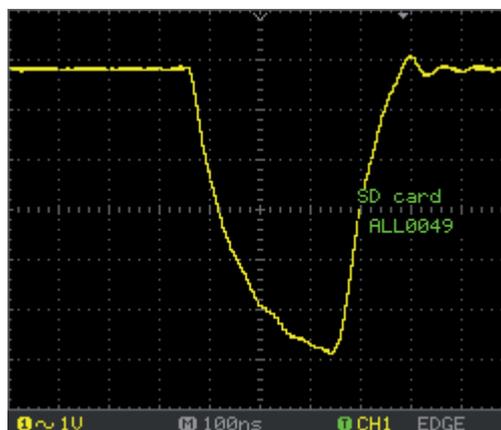
Для увеличения отклика измеряемый импульс тока пропускался через соленоид 7 из медного провода с числом витков $N_2 = 5$, намотанного вокруг чувствительного волоконного контура. Импульсы тока T_c формировались с помощью полевого транзистора FDD6635 и имели амплитуду 6 А при длительностях 1.1 и 0.275 мкс (рис. 7).

На рис.8 показан отклик ВОДТ на вышеуказанные импульсы тока для двух значений постоянной времени фотоприемника. Результаты измерений параметров отклика для постоянной времени $T_t = 1.1$ мкс приведены в табл.1.

Отметим, что среднеквадратичное значение (СКО) шума здесь оценивалось по осциллограмме в предположении, что «размах» шума соответствовал сумме шести СКО. Оптимальная полоса фоторегистрации ΔF_{opt} составила 255 кГц.



а



б

Рис.7. Осциллограммы импульсов тока, используемых в эксперименте: $I_0 = 6$ А, $T_c = 1.1$ мкс (а) и $I_0 = 6$ А, $T_c = 0.275$ мкс (б).

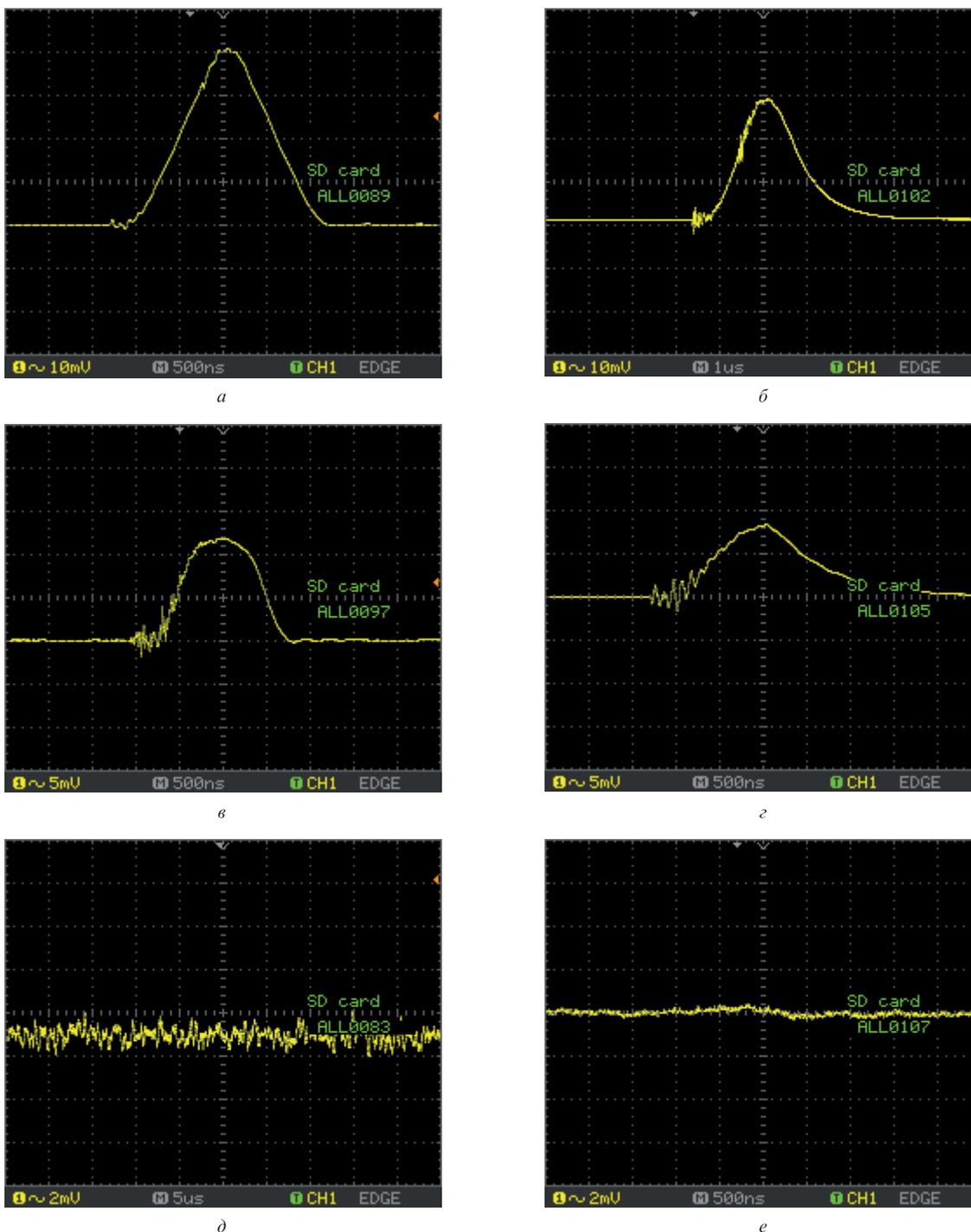


Рис.8. Осциллограммы отклика $U_s(t)$ (a–z) и шума $U_n(t)$ (д, е) ВОДТ при $T_c = 1100$ нс, $T_{ph} = 88$ нс (а), $T_c = 1100$ нс, $T_{ph} = 625$ нс (б), $T_c = 275$ нс, $T_{ph} = 88$ нс (в); $T_c = 275$ нс, $T_{ph} = 625$ нс (г), $T_{ph} = 88$ нс (д) и $T_{ph} = 625$ нс (е).

Табл.1.

Длительность импульсов (мкс)	Параметры отклика				
	T_{ph} (мкс)	U_{smax} (мВ)	T_x (мкс)	U_n (СКО) (мВ)	r
$T_c = 1.1$	0.089	40	1.13	0.33	121
	0.625	28	1.36	0.13	215
	1.34	19	1.80	0.09	211
$T_c = 0.275$	0.089	12	1.10	0.33	36
	0.625	8.5	1.2	0.13	65
	1.34	5.2	1.7	0.09	58

4. Обсуждение результатов

Анализ расчетных и экспериментальных результатов, представленных на рис.4, 5, 8 и в табл.1, позволяет сделать вывод об их хорошем качественном и удовлетворительном количественном согласии. Из этих результатов следует, что относительные величины параметров отклика U_{smax} , T_x при разных постоянных времени фотоприемника T_{ph} определяются величиной T_{ph} и практически не зависят от длительности импульса тока T_c . Подчеркнем, что указанное свойство относится к исследованному диа-

пазону длительностей тока T_c , равных или меньших времени пролета света по контуру: $T_c = (0.25 - 1.0)T_t$.

Другой важный вывод – это наличие максимума отношения сигнала к шуму при определенной постоянной времени T_{ph}/T_t , которая в указанном диапазоне T_c примерно равна 0.6. Отношение сигнал/шум может быть увеличено до двух раз. Следует отметить, что этот вывод получен при условии, что для сужения полосы (увеличения T_{ph}) изменялась величина емкости C_{ph} при неизменном сопротивлении R_{ph} нагрузочного резистора фотодиода. Между тем отношение сигнал/шум в рассматриваемой схеме фотоприемника можно дополнительно повысить, увеличивая R_{ph} при минимально возможной величине C_{ph} (определяемой емкостью монтажа). Это следует из соотношения (15): $r \sim 1/\sqrt{\Delta F} \sim \sqrt{R_{ph}}$. В рассматриваемой схеме возможно дополнительное увеличение r в 2.5 раза, т. е. общее повышение отношения сигнала к шуму составит примерно пять раз.

Отметим также, что приведенные значения выигрыша r получены при произвольном задании исходной широкой полосы (минимальной постоянной времени $T_{ph}/T_t = 0.1$), при которой искажения считались допустимыми.

Оценка величины r в абсолютных единицах по формуле (15) для параметров настоящей работы и $T_{ph} = 0.625$ мкс дала следующие результаты: $r = 207$ при $T_c = 1.1$ мкс, $k_{ph} = 0.75$, $a = 4$, $V = 7 \times 10^{-7}$ рад/А, $S = 1.23$, $K = 0.6$, $\Delta\lambda = 20$ нм, $\lambda = 1.55$ мкм, $I_0 = 6$ А, $T_t = 1.1$ мкс. Эта оценка согласуется с экспериментальными данными: $r = 215$ (см. табл. 1). При уменьшении длительности импульса в четыре раза ($T_c = 0.275$ мкс) экспериментально измеренная амплитуда отклика и значение r оказались в 3.3 раза меньше, чем при $T_c = 1.1$ мкс. Следует отметить, что для безынерционной системы фоторегистрации ($T_{ph} = 0$) [7] при данном соотношении длительностей импульсов результаты должны различаться в четыре раза (это справедливо для прямоугольной формы импульса тока).

В условиях данного эксперимента для $T_c = 1.1$ мкс минимально регистрируемый ток (обнаружительная способность ВОДТ) $I_{0min} = I_0/r = 30$ мА. С уменьшением длительности импульса I_{0min} (пороговый ток) в соответствии с вышесказанным растет по закону, близкому к линейному.

Для улучшения обнаружительной способности широкополосного ВОДТ необходим дальнейший поиск способов повышения отношения сигнал/шум при регистрации импульсов тока наносекундного диапазона с малой амплитудой. Одним из путей решения данной задачи может быть использование для регистрации наносекундных импульсов тока новых оптических схем ВОДТ с подавлением избыточного шума и чувствительных волокон с повышенной постоянной Верде.

5. Заключение

В работе экспериментально и теоретически изучена зависимость амплитудных и шумовых параметров отклика волоконно-оптического датчика тока на основе эффекта Фарадея от частотной полосы фотоприемника при регистрации прямоугольных импульсов тока. Рассмотрен случай коротких импульсов тока, длительность которых не превышает времени распространения излучения по чувствительному контуру. Именно в этом случае важно повышать отношение сигнал/шум, в частности, уменьшая частотную полосу фотоприемника. Продемонстрировано наличие оптимальной полосы фоторегистрации, при которой отношение сигнала к шуму имеет выраженный максимум. При этом ширина оптимальной полосы близка по величине обратному времени прохода света по волокну. Обнаруженная закономерность объясняется различными зависимостями амплитуды отклика и величины белого шума оптического излучения от частотной полосы фотоприемника. Максимальное увеличение отношения сигнала к шуму при выборе оптимальной полосы может достигать двух и более раз по сравнению с режимом фоторегистрации, при котором искажения формы отклика, обусловленные полосой фотоприемника, малы. Предложена методика коррекции амплитудной погрешности при оптимальной полосе. Другим достоинством предлагаемого подхода является существенное снижение требований к быстродействию фотоэлектронного блока регистрации. Результаты работы могут быть использованы при разработке широкополосных ВОДТ, предназначенных для регистрации импульсных токов.

1. Laming R.I., Payne D.N. *J. Lightwave Technol.*, **7** (12), 2084 (1989).
2. Blake J., Tantaswadi P., De Carvalho R.T. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **11** (1), 116 (1996).
3. Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brandle H. *Opt. Lasers Eng.*, **43** (3), 511 (2005).
4. Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К., Сазонов А.И., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Усов А.И. *Квантовая Электроника*, **36** (3), 287 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (3), 287 (2006)].
5. Kersey A.D., Bucholtz F., Dandridge A. *Int. J. Optoelectron.*, **3** (4), 323 (1988).
6. Chen G.Y., Newson N.P. *Electron. Lett.*, **50** (8), 626 (2014).
7. Пржиялковский Я.В., Губин В.П., Старостин Н.И., Моршнев С.К., Сазонов А.И. *Квантовая электроника*, **48** (1), 62 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (1), 62 (2018)].
8. Burns W.K., Moeller R.P., Dandridge A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (8), 606 (1990).
9. Губин В.П., Моршнев С.К., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Сазонов А.И., Пржиялковский Я.В., Боев А.И. *Квантовая электроника*, **41** (9), 815 (2011) [*Quantum Electron.*, **41** (9), 815 (2011)].