

УДК 621.383

# Исследование вероятности стирания двоичных символов «0» при возникновении ошибочной регистрации данных в квантово-криптографическом канале связи с приемником на основе счетчика фотонов

Применительно к асинхронному двоичному квантово-криптографическому каналу связи с приемником на основе счетчика фотонов с мертвым временем продлевающегося типа получены зависимости отношения вероятности стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  к вероятности ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{\text{ош0}}$  от интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи этих символов  $J_0$ . Установлено, что вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  вносит основной вклад в величину вероятности ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{\text{ош0}}$  при  $J_0 \leq 98,98 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,48$  В; при  $J_0 \leq 59,15 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,54$  В; при  $J_0 \leq 11,11 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,65$  В.

**А. М. ТИМОФЕЕВ,**  
доцент кафедры защиты информации,  
К. Т. Н., доцент

Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

## Ключевые слова:

счетчик фотонов, мертвое время продлевающегося типа, вероятность ошибочной регистрации двоичных данных, канал связи, напряжения питания.

**Введение.** При проектировании современных систем связи особое внимание уделяют обеспечению достаточно высоких показателей надежности [1]. Это становится еще более значимо, когда речь идет о системах связи, решающих разнообразные задачи в области информационной безопасности – конфиденциальность и целостность передаваемых данных, аутентификация данных и их отправителя и пр. [1, 2]. Решение такого рода задач, как правило, требует комплексного подхода, при котором необходимо задействовать различные механизмы, включая, например, использование квантово-криптографических каналов связи [2]. Для передачи информации в квантово-криптографических каналах связи применяют маломощные оптические импульсы, которые могут содержать не более десяти фотонов в расчете на каждый бит (символ). За счет использования квантово-механического ресурса при кодировании передаваемых данных появляется

возможность обеспечивать абсолютную скрытность и конфиденциальность передаваемой информации. Регистрация маломощных оптических импульсов возможна с помощью высокочувствительных приемных модулей, например счетчиков фотонов [2–4]. Однако счетчики фотонов ввиду неидеальности своих характеристик могут приводить к ошибкам при регистрации данных, что уменьшает пропускную способность указанных каналов связи, а также снижает уровень их информационной безопасности [5]. Одной из причин таких ошибок является, в частности, то, что счетчики фотонов характеризуются ненулевым мертвым временем [2, 3].

Мертвое время счетчика фотонов – это время, в течение которого счетчик фотонов нечувствителен к падающему на него оптическому излучению [3].

Известные методы оценки показателей надежности [6], учитывающие ошибки при передаче и приеме информации, неприменимы для

квантово-криптографических каналов связи. В работе [7] получено выражение для оценки вероятности ошибочной регистрации информации и описана методика выбора интенсивностей регистрируемых оптических излучений при передаче двоичных символов. Однако для достижения наименьших потерь информации в квантово-криптографическом канале связи, содержащем в качестве приемника счетчик фотонов, весьма важно подбирать не только интенсивности регистрируемых оптических излучений, но и напряжение питания фотоприемника. При этом в литературных источниках отсутствует экспериментальная оценка влияния интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче информации в квантово-криптографическом канале связи, содержащем в качестве приемного модуля счетчик фотонов, на вероятность ошибочной регистрации данных с учетом напряжения питания фотоприемника. Целью настоящей работы является выполнение такой экспериментальной оценки.

Объектом исследования являлся асинхронный двоичный несимметричный однородный квантово-криптографический канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе лавинного фотоприемника ФД-115Л, включенный по схеме пассивного гашения лавины. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен тем, что асинхронный способ передачи и приема информации не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приема синхроимпульсов [7, 8]. Схема пассивного гашения лавины имеет меньшую погрешность измерений регистрируемого излучения благодаря отсутствию принудительного гашения лавинного пробоя, что выгодно ее отличает от других схем – активного гашения и импульсного смещения  $p$ - $n$ -перехода (со стробированием). Фотоприемники ФД-115Л используются для работы в ближнем ИК-диапазоне и за счет применяемого при их изготовлении кремниевого полупроводникового материала характеризуются меньшими шумами, связанными с умножением носителей, и лучшей пороговой чувствительностью по сравнению с германиевыми и галлиевыми фотоприемниками. Также следует отметить, что кремниевые лавинные фотоприемники позволяют реализовывать режим счета фотонов при комнатных температурах [3].

Предметом исследования являлась экспериментальная оценка влияния интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи двоичных символов «0», на вероятность ошибочной регистрации этих символов.

**Выражение для оценки вклада вероятности стирания двоичных символов «0» в вероятность ошибочной регистрации этих символов.** Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что квантово-криптографический канал связи создан на базе приемопередающих устройств [8], математическая модель которого дана в [7].

Для оценки вклада вероятности стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  в вероятность ошибочной регистрации этих символов  $P_{ош0}$  воспользуемся отношением [7]:

$$\frac{P(-/0)}{P_{ош0}} = \frac{\sum_{N=0}^{N_1-1} P_{st0}(N)}{1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N)}, \quad (1)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – нижний и верхний пороговые уровни регистрации соответственно;  $P_{st0}(N)$  – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «0».

Вероятность стирания двоичных символов «0» – это вероятность того, что при передаче двоичного символа «0» на выходе канала связи не будет зарегистрирован ни символ «0», ни символ «1» [7].

Под вероятностью ошибочной регистрации двоичных символов «0» будем понимать вероятность того, что при передаче двоичного символа «0» на выходе канала связи этот символа не будет зарегистрирован.

Нижний пороговый уровень регистрации – это наименьшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При регистрации импульсов в количестве, меньшем  $N_1$ , принимается решение, что символа отсутствует.

Верхний пороговый уровень регистрации – это наибольшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа  $N_2$  делается вывод, что передан символ «1».

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счетчика фотонов соответственно в отсутствие оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [3].

С использованием установки [8] получены статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «0»  $P_{st0}(N)$ . Для достижения наименьших потерь информации

в исследуемом канале связи использовалась методика [7], на основе которой выбирались нижний и верхний пороговые уровни регистрации, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «0»  $P_{st0}(N)$ . В качестве критерия для реализации этой методики использован параметр [7]:

$$K_p = \frac{1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) + \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}{1 + \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) - \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}, \quad (2)$$

где  $P_{st1}(N)$  – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «1».

Таким образом, можно считать, что вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  вносит основной вклад в величину вероятности ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{ош0}$  при выполнении условия:

$$P(-/0) / P_{ош0} \geq 0,5. \quad (3)$$

**Экспериментальные исследования: условия проведения, результаты и их обсуждение.** Важно отметить, что при проведении исследований на вход экспериментальной установки подавались как символы «0», так и символы «1» в связи со следующими особенностями исследованного канала связи. Интенсивность оптического излучения, используемая для передачи заданного двоичного символа, влияет не только на вероятность ошибочной регистрации одноименного символа, но и на вероятность ошибочной регистрации другого двоичного

символа [5]. Так, интенсивность  $J_0$  влияет не только на вероятность ошибочной регистрации символа «0», но и на вероятность ошибочной регистрации символа «1», а интенсивность  $J_1$  влияет не только на вероятность ошибочной регистрации символа «1», но и на вероятность ошибочной регистрации символа «0». Учитывая это, а также тот факт, что скорость передачи информации для рассматриваемого канала связи максимальна при равновероятном появлении двоичных символов «0» и «1» на входе канала связи [5], количество двоичных символов «0», подаваемых на вход экспериментальной установки, равнялось количеству двоичных символов «1». Таким образом, выполнялось условие:

$$P_s(0) = P_s(1) = 0,5, \quad (4)$$

где  $P_s(0)$  и  $P_s(1)$  – вероятности появления символов «0» и «1» соответственно на входе канала связи.

Выполнение условия (4) также позволяет обеспечивать наиболее высокую пропускную способность рассматриваемого канала связи [5, 9].

Вычисление  $P(-/0) / P_{ош0}$  выполнялось для каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа при различных значениях напряжения питания лавинного фотодиода  $U_{пит}$  и интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи двоичных символов «0»  $J_0$ .

На рисунке представлены зависимости отношения  $P(-/0) / P_{ош0}$  от интенсивности оптического

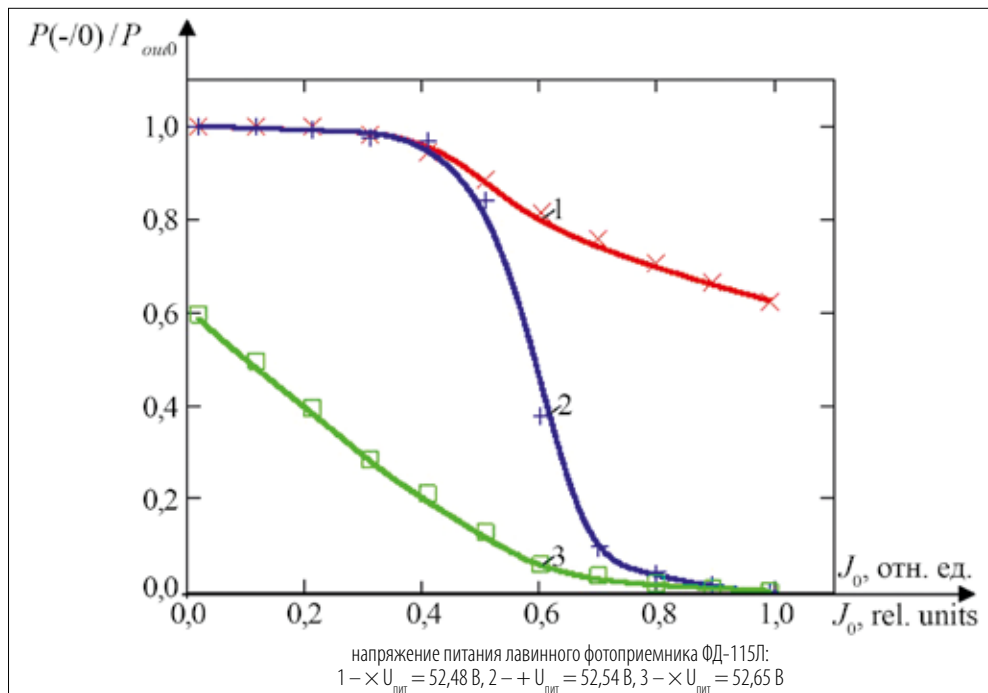


Рисунок – Зависимость отношения  $P(-/0) / P_{ош0}$  от интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи двоичных символов «0»

сигнала, используемого для передачи двоичных символов «0».

Отметим, что для реализации режима счета фотонов напряжения питания лавинного фотоприемника выбирались вблизи напряжения его лавинного пробоя, которое определялось по методике [10] и составляло 52,71 В. Интенсивности оптических излучений  $J_0$ , используемых для передачи двоичных символов «0», нормированы на максимальное значение из исследуемого диапазона. Все исследования проводились при температуре 293 К.

Из результатов, представленных на рисунке, видно, что при наименьших из исследуемых значениях напряжений питания лавинного фотоприемника  $U_{\text{пит}}$  с увеличением интенсивности оптического сигнала  $J_0$  зависимости  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$  имеют участок, близкий к линейному, со значениями, примерно равными единице, после которого наблюдается спад этих зависимостей (см. рис. 1, кривые 1 и 2). Однако с ростом напряжения питания лавинного фотоприемника с увеличением интенсивности оптического сигнала  $J_0$  зависимость  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$  не имеет такого линейного участка и уменьшается практически во всем исследуемом диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  (см. рис. 1, кривая 3).

Наличие диапазона интенсивностей оптического сигнала  $J_0$ , на котором зависимости

$P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$  практически не изменяются и близки к единице, объясняется следующим. При малых значениях напряжений питания лавинного фотоприемника  $U_{\text{пит}}$  мертвое время счетчика фотонов достаточно большое, а его квантовая эффективность регистрации невелика [3]. Это приводит к тому, что при наименьших из исследуемого диапазона значениях интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, большем нижнего порогового уровня регистрации  $N_1$ , чрезвычайно мала [11]. Вероятность ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{\text{ош0}}$ , напротив, весьма высока [5], что обусловлено большой величиной вероятности стирания этих символов  $P(-/0)$ . Таким образом, выполняется условие:

$$P_{\text{ош0}} \approx P(-/0). \quad (5)$$

Поэтому отношение  $P(-/0) / P_{\text{ош0}} \approx 1$  (см. рис. 1, кривые 1 и 2).

С увеличением интенсивности оптического сигнала  $J_0$  вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в диапазоне от нижнего порогового уровня регистрации  $N_1$  до верхнего порогового уровня регистрации  $N_2$  растет [5]. Однако при этом вероятность регистрации на выходе

счетчика фотонов импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации  $N_2$ , остается достаточно низкой. Следовательно, в указанном диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  вероятность ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{\text{ош0}}$  уменьшается в основном за счет снижения вероятности стирания этих символов  $P(-/0)$  [5]. В результате в таком диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  по-прежнему вносит основной вклад в величину вероятности ошибочной регистрации этих символов  $P_{\text{ош0}}$ . Таким образом, условие (5) выполняется, поэтому отношение  $P(-/0) / P_{\text{ош0}} \approx 1$  и зависимости  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$  имеют участок, близкий к линейному, со значениями, примерно равными единице (см. рис. 1, кривые 1 и 2).

Дальнейший рост интенсивности  $J_0$  при прочих равных параметрах приема приводит к увеличению вероятности регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации  $N_2$ . При этом вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  уменьшается вплоть до своего наименьшего значения, после чего практически не меняется [5]. В результате в указанном диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  вероятность  $P(-/0)$  вносит все меньший вклад в величину  $P_{\text{ош0}}$ . Вместе с тем, вклад вероятности регистрации на выходе канала связи символа «1» при наличии символа «0» на его входе  $P(1/0)$  в величину  $P_{\text{ош0}}$ , напротив, растет. Поэтому зависимости  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$  спадают вплоть до своего наименьшего значения.

Важно отметить, что при прочих равных параметрах приема спад зависимости  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от  $J_0$ , который определялся по 5%-ному отклонению от отношения  $P(-/0) / P_{\text{ош0}}$  от его максимального значения, начинает проявляться при меньших интенсивностях оптического сигнала  $J_0$  с увеличением напряжения питания лавинного фотоприемника: при  $J_0 \geq 39,54 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,48$  В; при  $J_0 \geq 32,35 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,54$  В; при  $J_0 \geq 4,64 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,65$  В.

Обусловлено это тем, что с увеличением напряжения питания лавинного фотоприемника мертвое время счетчика фотонов уменьшается, переходя в насыщение, а его квантовая эффективность регистрации вначале растет и после достижения максимальной величины уменьшается [3]. В диапазоне напряжений питания лавинного фотоприемника, на котором с ростом  $U_{\text{пит}}$  мертвое время счетчика фотонов уменьшается, а его квантовая эффективность регистрации растет, количество так называемых «просчетов» сокращается.

В свою очередь, это приводит к тому, что при прочих равных параметрах приема спад зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  с ростом  $U_{пит}$  начинает проявляться при меньших величинах  $J_0$ , как отмечалось ранее.

В результате этого при прочих равных параметрах приема в диапазоне  $U_{пит}$ , на котором с ростом напряжения питания лавинного фотоприемника мертвое время счетчика фотонов уменьшается, а его квантовая эффективность регистрации растет, отношение  $P(-/0) / P_{ош0}$  уменьшается с ростом  $U_{пит}$ . Наблюдается это во всем диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$ , на котором зависимости  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  спадают вплоть до своего наименьшего значения (см. рис. 1). Так, например, при интенсивности оптического сигнала  $J_0 = 44,98 \times 10^{-2}$  отн. ед. отношение  $P(-/0) / P_{ош0}$  равно:  $91,75 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,48$  В;  $86,89 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,54$  В;  $15,06 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,65$  В.

При наибольшем из исследуемых значений напряжении питания лавинного фотоприемника зависимость  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  не имеет линейного участка (см. рис. 1, кривая 3) и характеризуется спадом во всем исследуемом диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$ , как отмечалось ранее. Причем максимум зависимости  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  не достигает значений, близких к единице, что наблюдалось при меньших напряжениях питания лавинного фотоприемника. Такое поведение зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  объясняется следующим.

С ростом  $U_{пит}$  средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов  $n_t$  растет [3], что имеет место не только в диапазоне напряжений питания лавинного фотоприемника, на котором с ростом  $U_{пит}$  мертвое время счетчика фотонов уменьшается, а его квантовая эффективность регистрации растет, но при более высоких значениях  $U_{пит}$ .

Следует отметить, что скорость счета темновых импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приемного модуля в единицу времени, когда регистрируемое оптическое излучение отсутствует [3]. Чем большее число темновых импульсов будет образовываться в единицу времени, тем больше вероятности того, что будет принят символ «0» и символ «1» соответственно при отсутствии двоичного символа «0» и при его наличии на входе канала связи. Скорость счета сигнальных импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приемного модуля в единицу времени при воздействии фотонов излучения (для оценки скоростей счета темновых и сигнальных импульсов

используют их средние значения  $n_t$  и  $n_{s0}$  соответственно [3]).

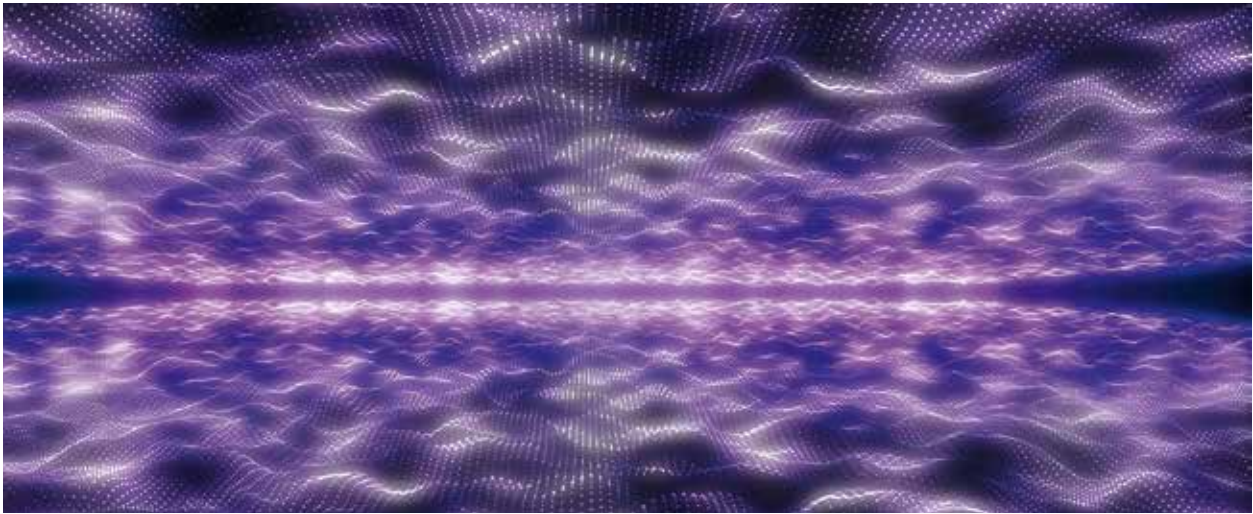
Увеличение  $n_t$  повышает среднюю скорость счета смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0»  $n_{s0}$  равную  $(n_t + n_{s0})$ . В результате этого при достаточно высоких значениях  $U_{пит}$  вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, меньшем нижнего порогового уровня регистрации  $N_1$ , снижается [5]. Однако вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации  $N_2$ , растет. Следовательно, даже при наименьших из исследуемого диапазона значениях интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  вероятность  $P(-/0)$  вносит не столь значимый вклад в величину вероятности  $P_{ош0}$ , чем при меньших напряжениях питания лавинного фотоприемника  $U_{пит}$ . В результате условие (5) не выполняется, поэтому отношение  $P(-/0) / P_{ош0}$  не достигает значений, близких к единице (см. рис. 1). Так, например, максимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$ , полученный при интенсивности оптического сигнала  $J_0 = 1,79 \times 10^{-2}$  отн. ед., равен:  $99,90 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,48$  В;  $99,88 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,54$  В;  $59,88 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,65$  В.

Важно также отметить, что при весьма высокой средней скорости счета  $n_t$  с увеличением интенсивности  $J_0$  вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, превышающем  $N_2$ , растет при меньших интенсивностях  $J_0$ , чем в случае более низких величин  $n_t$ . Это приводит к тому, что при  $U_{пит}$ , соответствующих достаточно большим значениям  $n_t$ , зависимость  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  не имеет линейного участка и уменьшается во всем исследуемом диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$  (см. рисунок, кривая 3).

На основании полученных экспериментальных результатов также установлено, что при прочих равных параметрах приема минимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  с увеличением напряжения питания лавинного фотоприемника вначале уменьшается, однако затем растет. Объясняется это следующим.

С увеличением напряжения питания лавинного фотоприемника угол наклона линейного участка зависимости  $n_{s0}(J_0)$  вначале увеличивается, после чего уменьшается [3]. При большем угле наклона линейного участка зависимости  $n_{s0}(J_0)$  обеспечивается наиболее высокая средняя скорость счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0»  $n_{s0}$ , соответствующая этому линейному участку. В свою очередь, при большей величине  $n_{s0}$  максимум статистического





распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0»  $P_{s0}(N)$  сдвигается в сторону больших значений  $N$ .

Отметим, что статистические распределения  $P_{s0}(N)$ , полученные по результатам выполненных экспериментальных исследований, имели схожий вид с теоретическими распределениями [12], поэтому в данной работе распределения  $P_{s0}(N)$  не приведены.

Указанный сдвиг максимума статистического распределения  $P_{s0}(N)$  приводит к уменьшению вероятности регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, меньшем нижнего порогового уровня регистрации  $N_1$ , а также к увеличению вероятности регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, большем верхнего порогового уровня регистрации  $N_2$ . Это снижает вероятность  $P(-/0)$ , однако увеличивает вероятность  $P_{ош0}$  за счет роста вероятности  $P(1/0)$ , поэтому минимум зависимости  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  уменьшается. Таким образом, при прочих равных параметрах приема в диапазоне напряжений питания лавинного фотоприемника, на котором с ростом  $U_{пит}$  угол наклона линейного участка зависимости  $n_{s0}(J_0)$  увеличивается, минимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  уменьшается. Однако в диапазоне напряжений питания лавинного фотоприемника, на котором с ростом  $U_{пит}$  угол наклона линейного участка зависимости  $n_{s0}(J_0)$  уменьшается, минимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  растет.

Указанные особенности поведения зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  приводят к тому, что при наибольших из исследуемых значениях  $J_0$  минимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  с ростом  $U_{пит}$  вначале уменьшается, а затем растет. Так, например, минимум зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$ , полученный при интенсивности оптического сигнала

$J_0 = 98,98 \times 10^{-2}$  отн. ед., равен:  $62,50 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,48$  В;  $0,14 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,54$  В;  $0,25 \times 10^{-2}$  для  $U_{пит} = 52,65$  В.

Также по результатам выполненных экспериментальных исследований установлено, что вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  вносит основной вклад в величину вероятности ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{ош0}$  при  $J_0 \leq 98,98 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{пит} = 52,48$  В; при  $J_0 \leq 59,15 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{пит} = 52,54$  В; при  $J_0 \leq 11,11 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{пит} = 52,65$  В.

**Заключение.** На основе методики снижения потерь информации в асинхронном двоичном квантово-криптографическом канале связи с приемником на основе счетчика фотонов с мертвым временем продлевающегося типа для различных напряжений питания лавинного фотоприемника  $U_{пит}$  получены зависимости отношения вероятности стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  к вероятности ошибочной регистрации двоичных символов «0»  $P_{ош0}$  от интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи этих символов  $J_0$ .

Определено, что при небольших значениях напряжений питания лавинного фотоприемника  $U_{пит}$  с увеличением интенсивности оптического сигнала  $J_0$  зависимости  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  имеют участок, близкий к линейному, со значениями, примерно равными единице, после которого наблюдается спад этих зависимостей. Однако с ростом напряжения питания лавинного фотоприемника с увеличением интенсивности оптического сигнала  $J_0$  зависимость  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$  не имеет такого линейного участка и уменьшается во всем исследуемом диапазоне интенсивностей оптического сигнала  $J_0$ .

Получено, что при прочих равных параметрах приема спад зависимостей  $P(-/0) / P_{ош0}$  от  $J_0$

начинает проявляться при меньших интенсивностях оптического сигнала  $J_0$  с увеличением напряжения питания лавинного фотоприемника  $U_{\text{пит}}$ : при  $J_0 \geq 39,54 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,48$  В; при  $J_0 \geq 32,35 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,54$  В; при  $J_0 \geq 4,64 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,65$  В.

Установлено, что вероятность стирания двоичных символов «0»  $P(-/0)$  вносит основной вклад в величину вероятности ошибочной регистрации

двоичных символов «0»  $P_{\text{ош0}}$  при  $J_0 \leq 98,98 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,48$  В; при  $J_0 \leq 59,15 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,54$  В; при  $J_0 \leq 11,11 \times 10^{-2}$  отн. ед. для  $U_{\text{пит}} = 52,65$  В.

Для достижения наименьших потерь информации при передаче двоичных символов «0» важно подбирать не только интенсивность используемого оптического излучения  $J_0$ , но и напряжение питания лавинного фотоприемника  $U_{\text{пит}}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щеглов, А. Ю. Анализ и проектирование защиты информационных систем. Контроль доступа к компьютерным ресурсам: методы, модели, технические решения / А.Ю. Щеглов. – СПб.: Профессиональная литература, 2017. – 416 с.
2. Килин, С. Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С. Я. Килин; под ред. С. Я. Килин, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцев. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 391 с.
3. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем: монография / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
4. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM / S. Hu [et al.] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, № 17. – P. 21685–21699. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/OE.26.021685/>. – Дата доступа: 03.03.2022.
5. Тимофеев, А. М. Скорость передачи информации однофотонного канала связи с приемным модулем на основе счетчика фотонов с мертвым временем продлевающегося типа / А.М. Тимофеев // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2019. – № 2. – С. 79–86.
6. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
7. Тимофеев, А. М. Методика достижения наименьших потерь информации в квантово-криптографическом канале связи с приемником на основе счетчика фотонов / А.М. Тимофеев // Веснік сувязі. – 2022. – № 6. – С. 40–44.
8. Тимофеев, А. М. Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи / А. М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2018. – т. 9.– № 1. – С. 17–27. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27>. – Дата доступа: 10.03.2022.
9. Биккенин, Р. Р. Теория электрической связи / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
10. Гулаков, И. Р. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях / И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. – Минск: Университетское, 1989. – 256 с.
11. Тимофеев, А. М. Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приемником на основе счетчика фотонов / А. М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2021. – т. 12. – № 2. – С. 156–165. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165>. – Дата доступа: 16.03.2022.
12. Тимофеев, А. М. Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи / А. М. Тимофеев // Вестник ТГТУ. – 2019. – т. 25.– № 1. – С. 36–46. – Режим доступа: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2019.01.pp.036-046>. – Дата доступа: 29.03.2022.

*An asynchronous binary quantum cryptographic communication channel with a receiver based on a photon counter with a dead time of an extending type was investigated. Dependences of the ratio of the probability of erasing binary symbols "0"  $P(-/0)$  to the probability of erroneous registration of binary symbols "0"  $P_{\text{err0}}$  on the intensity of the optical signal used to transmit these symbols  $J_0$  were obtained. It has been established that the probability of erasing binary symbols "0"  $P(-/0)$  makes the main contribution to the probability of erroneous registration of binary symbols "0"  $P_{\text{err0}}$  at  $J_0 \leq 98,98 \times 10^{-2}$  rel. units for  $U = 52,48$  V; at  $J_0 \leq 59,15 \times 10^{-2}$  rel. units for  $U = 52,54$  V; at  $J_0 \leq 11,11 \times 10^{-2}$  rel. units for  $U = 52,65$  V.*

**Key words:** photon counter, dead time of the prolonging type, probability of erroneous registration of binary data, communication channel, supply voltage.

Получено 07.04.2022.