

Егор А. Симахин¹, Анатолий П. Дураковский², Григорий П. Гавдан³,
Леонид Н. Кессаринский⁴

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: EASimakhin@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4019-9694>

²e-mail: APDurakovskiy@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8311-7735>

³e-mail: GPGavdan@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3185-3076>

⁴e-mail: LNKessarinskiy@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7756-6166>

АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕРФЕЙСА DisplayPort, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОБОЧНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.10>

Аннотация. Целью статьи является определение возможных подходов к анализу побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) мониторов с интерфейсом DisplayPort в рамках инструментальных исследований защищенности информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники (СВТ). В качестве исследуемого СВТ рассматривается автоматизированное рабочее место с одним монитором и, соответственно, спецификация относительно однопоточного режима передачи видеосигнала. Для достижения цели в статье исследуются компоненты архитектуры интерфейса DisplayPort, характеристики среды распространения сигнала от источника к приемнику и алгоритм формирования транспортных блоков данных. Описывается взаимосвязь количества активных линий передачи данных, тактовой частоты на линию и характеристик пересылаемых данных. Поставлен эксперимент, результаты которого показали, что мощность ПЭМИ зависит от экранирующих мер, применяемых в конструкции кабеля. При проведении исследования компонентов архитектуры интерфейса, влияющих на распределение энергии ПЭМИ в спектре, определено, что помехоустойчивость линий основного канала зависит от настроек конфигурации интерфейса DisplayPort – DPCD. Такая зависимость обуславливает возможность изменения конфигурации (например, скремблирование, шифрование данных и применение частотной модуляции с расширенным спектром) программными средствами и таким образом существенно влиять на качество проведения инструментальных испытаний по оценке защищенности обрабатываемой информации. По результатам исследования предложен порядок анализа необходимой информации для применения подходов и разработан порядок применения инструментальных действий при подготовке к лабораторным исследованиям, что позволит получить более точные значения мощности полезного сигнала при проведении контроля защищенности обрабатываемой информации СВТ с интерфейсом DisplayPort. Дальнейшее исследование будет направлено на апробацию описанных подходов в лабораторных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: информационная безопасность, побочное электромагнитное излучение, DisplayPort, безэховая камера, лабораторные исследования.

Для цитирования: СИМАХИН, Егор А. и др. АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕРФЕЙСА DisplayPort, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОБОЧНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], т. 29, №. 1, р. 108–124, 2022. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1410>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.10>.

Благодарности. Работа выполнена в рамках «Гранта ИБ МТУСИ» Федерального проекта «Информационная безопасность» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Грант выдан Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, оператор конкурса грантов Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), № соглашения 40469-28/2021-К.

Egor A. Simakhin¹, Anatoly P. Durakovskiy², Grigory P. Gavdan³,
Leonid N. Kessarinskiy⁴

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia*

¹*e-mail: EASimakhin@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4019-9694>*

²*e-mail: APDurakovskiy@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8311-7735>*

³*e-mail: GPGavdan@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3185-3076>*

⁴*e-mail: LNKessarinskiy@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7756-6166>*

Analysis of the components of the DisplayPort interface architecture that affect the side electromagnetic radiation

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.10>

Abstract. The present paper aims to determine possible approaches to the analysis of side electromagnetic radiation (EMR) of the monitor video subsystem with the DisplayPort interface within the framework of the investigation of computer processed information (CPI) security. An automated workplace with a single monitor and, accordingly, a specification for a single-threaded video signal transmission mode is considered as the CPI under study. In order to achieve this aim, the components of the DisplayPort interface architecture, the characteristics of the signal propagation medium from the source to the receiver and algorithm for forming transport units have been studied. The correlation between the number of active data transmission lines, the clock frequency per line and the characteristics of the transmitted data are described. The conducted experiment has shown that the power of the EMR depends on the shielding actions used in the cable design. When studying the interface architecture components that affect the EMR energy spectrum, it was found that the interference immunity of the main channel lines depends on the settings of the DisplayPort - DPCD. This dependence makes possible to change the configuration (for example, scrambling, data encryption and the use of frequency modulation with an extended spectrum) by software tools and thus significantly affect the quality of laboratory testing. Based on the results of the present study, a procedure for analyzing the necessary information for the application of approaches is proposed and the procedure for applying instrumental actions in preparation for laboratory studies is developed. This will allow obtaining more accurate values of the power of the useful signal when monitoring the processed information security of the CPI with the DisplayPort interface. Further research will be aimed at laboratory tests of the described approaches under operating conditions.

Keywords: information security, side electromagnetic radiation, DisplayPort, anechoic chamber, laboratory tests.

For citation. SIMAKHIN, Egor A. et al. Analysis of the components of the DisplayPort interface architecture that affect the side electromagnetic radiation. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 108–124, 2022. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1410>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.1.10>.

Acknowledgement. The work was supported by the "IB MTUCI Grant" of the Federal Project "Information Security" of the national program "Digital Economy of the Russian Federation". The grant was issued by the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation, the operator of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), contract №. 40469-28/2021-K.

Введение

Одним из существенных факторов обеспечения защищенности информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники (СВТ), является противодействие утечке защищаемой информации за счет побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН). Исследования в данном направлении показывают возможность обнаружения уязвимых интерфейсов передачи данных СВТ. В [1], например, автор исследовал побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ) от четырех мониторов с жидкокристаллическим дисплеем, оценил зависимость формата и параметров синхронизации. В [2] исследованы принципы утечки информации с использованием дифференциальных сигнальных кабелей,

таких как кабель мультимедийного интерфейса высокой четкости (HDMI), кабель цифрового визуального интерфейса (DVI) и кабель низковольтной дифференциальной сигнализации (LVDS). В этой же работе показано, что побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ) от дифференциальных сигнальных кабелей имеют не только амплитудную модуляцию, но и частотную модуляцию, что существенно расширяет возможности злоумышленникам для перехвата и последующего восстановления полезной информации. В [3–5] приведены результаты исследований ПЭМИ от HDMI, USB-накопителя, USB-разъема и контроллера. Результаты исследований перехвата и последующего восстановления полезной информации из исходящего видеосигнала приведены в [6–10]. Наряду с этим, проводятся исследования по анализу подходов к обеспечению требуемого уровня защищенности СВТ [11] и разработке программно-аппаратных комплексов для решения задачи тестирования систем защиты информации [12–13].

С возросшим объемом обрабатываемой информации обширное распространение получили мониторы с высокоскоростными интерфейсами передачи данных, например, HDMI и DisplayPort. Исследования побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) мониторов с подобными интерфейсами вызывают особый интерес со стороны специалистов по технической защите информации, в частности работы с экспериментальным обоснованием.

Исследования такого рода регламентируются методическими рекомендациями, в целом определяющими порядок действий при проведении контроля защищенности СВТ. Для разработки подобных рекомендаций требуется проведение анализа характеристик рассматриваемого интерфейса, его спецификации, описание подхода к обнаружению информативных частот и инструментальное подтверждение в лабораторных или реальных условиях эксплуатации. В настоящее время решение описываемой задачи для высокоскоростных интерфейсов передачи данных частично определено, в частности, например, для интерфейса HDMI [14] и отсутствует для интерфейса DisplayPort, вследствие чего не представляется возможным сформировать методические рекомендации при отсутствии четко определенных подходов к анализу ПЭМИ мониторов с интерфейсом DisplayPort.

Для решения данной проблемы требуется провести анализ технологии DisplayPort и на основании полученных сведений сформировать возможные подходы к анализу ПЭМИ мониторов с интерфейсом DisplayPort в рамках лабораторных исследований защищенности СВТ, что и является целью статьи.

1. Анализ технологии DisplayPort

Впервые спецификация интерфейса DisplayPort была принята Ассоциацией стандартизации видеoeлектроники (VESA) еще в 2006 г.¹. Данный стандарт должен был удовлетворить межотраслевые потребности и решить технические задачи по их обеспечению. Одной из таких задач является применение встроенных в архитектуру интерфейса функций для снижения восприимчивости к электромагнитным помехам и уменьшения количества линий передачи. Иными словами, характеристики разработанного интерфейса должны соответствовать требованиям межгосударственных стандартов, относящихся к деятельности подкомитета CIS/B Специального международного комитета по радиопомехам (CISPR): «Помехи, относящиеся к промышленному, научному и медицинскому радиочастотному оборудованию, к другому (тяжелому) промышленному

¹VESA DisplayPort Standard Version 1, Revision 2, 2010. URL: <https://glenwing.github.io/docs/DP-1.2.pdf>. (дата обращения: 11.02.2022).

оборудованию, к воздушным линиям электропередач, к высоковольтному оборудованию и к электрической тяге».

В настоящее время утверждено несколько версий данного стандарта, начиная от версии 1.0 до актуальной версии – 2.0, принятой в 2019 г. В связи с преимуществом технологии DisplayPort, VESA ограничила возможность ознакомления с интеллектуальной собственностью и в открытом доступе представлены спецификации интерфейса только до версии стандарта 1.2 включительно, которая рассматривается в статье.

Для формирования подходов к анализу ПЭМИ монитора с интерфейсом DisplayPort, необходимо, исходя из спецификации, определить характеристики технологии, влияющие на утечку информации по рассматриваемому техническому каналу. Для решения данной задачи следует проанализировать принципы его работы, архитектуру интерфейса, среду распространения сигнала от источника к приемнику и алгоритм формирования данных для их передачи.

1.1 Доступные режимы работы

До проведения инструментальных испытаний защищенности обрабатываемой информации для каждого СВТ определяют требуемые условия его эксплуатации для исполнения служебных обязанностей сотрудниками. Стандарт описывает передачу данных в двух режимах: Single Stream Transport (SST) и Multi-Stream Transport (MST). Режим MST объединяет несколько видеосигналов в один поток и позволяет транслировать независимые изображения с одного настольного компьютера или ноутбука, формировать последовательное подключение нескольких мониторов с помощью одного соединения – «Гирляндная цепь», расширять экран монитора и дублировать изображение рабочего стола на вспомогательные или дополнительные мониторы. В режиме SST видеосигнал передается по умолчанию в виде одного потока на один монитор. Исходя из наиболее распространенного вида СВТ в организации – это автоматизированное рабочее место с одним монитором, для которого в данной статье рассматривается спецификация относительно однопоточного режима передачи.

В соответствии с рассматриваемой спецификацией для корректной передачи потока данных интерфейс DisplayPort имеет основной канал (Main Link), вспомогательный канал (Auxiliary channel – AUX CH) и линию «горячего подключения» (Hot Plug Detect – HPD). Основной канал представляет собой однонаправленный канал с высокой пропускной способностью и малой задержкой, используемый для изохронной передачи данных. Вспомогательный канал представляет собой полудуплексный двунаправленный канал, используемый для управления каналом связи. Линия HPD обслуживает запросы на прерывание работы (сопряжение, наличие ошибок, изменения в режиме работы) приемным устройством. Схематично исследуемые каналы интерфейса представлены на рис. 1.

Вследствие изохронности, передача данных от источника к приемнику осуществляется с постоянной скоростью. Для обеспечения этого основной канал поддерживает три варианта количества линий – 1, 2 и 4, три скорости передачи на полосу – 1,62 Гбит/с, 2,7 Гбит/с и 5,4 Гбит/с, что определяет три режима работы интерфейса – RBR, HBR, HBR2.

Соответствие скорости передачи данных, пропускной способности и количества задействованных линий режимам работы представлено в табл. 1.

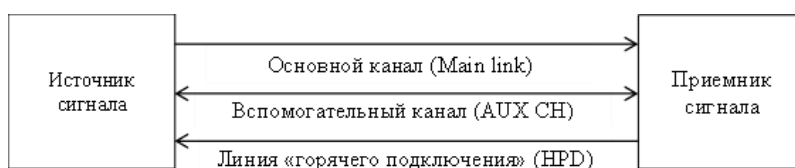


Рис. 1. Каналы интерфейса DisplayPort
 Fig. 1. DisplayPort interface channels

Таблица 1. Режимы работы интерфейса DisplayPort

Режим работы	Количество линий	Пропускная способность на линию		
		1,62 Гбит/с	2,7 Гбит/с	5,4 Гбит/с
RBR	1	162 Мбайт/с	270 Мбайт/с	540 Мбайт/с
HBR	2	324 Мбайт/с	540 Мбайт/с	1080 Мбайт/с
HBR2	4	648 Мбайт/с	1080 Мбайт/с	2160 Мбайт/с

Скорость передачи данных на линию и, соответственно, их количество определяется возможностями источника и приемника, качеством кабеля. Для выбора скорости передачи данных приемное устройство записывает свои возможности в поля метаданных для устройств отображения – Extended Display Identification Data (EDID) и в поля настроек интерфейса – DisplayPort Configuration Data (DPCD), а источник, после передачи сигнала обнаружения HPD, проверяет предоставленные данные. При повреждении данных EDID, источник выбирает один из набора конфигураций резервных форматов видео. Если ни один из резервных форматов не является приемлемым, источник выбирает конфигурацию отказоустойчивого режима: 640*480, 60 Гц в соответствии со стандартом VESA DMT². При успешном считывании конфигурации приемника следует этап настройки и тестирования соединения, за что отвечает режим Link Training.

Согласно стандарту, для корректной передачи данных источник и приемник могут поддерживать минимальное количество линий. Вследствие этого, устройства, поддерживающие две линии передачи данных, должны поддерживать режимы работы RBR и HBR, в то время как устройства, поддерживающие четыре линии передачи данных, должны поддерживать режимы работы RBR, HBR и HBR2. При успешном результате тестирования источник и приемник согласовывают оптимальное количество линий, скорость передачи данных и, как следствие, тактовую частоту передачи на линию. Для интерфейса DisplayPort 1.2 определено несколько значений тактовых частот передачи: 162 МГц, 270 МГц и 540 МГц. Зависимость тактовой частоты передачи от пропускной способности на линию представлена в табл. 2.

Таблица 2. Тактовая частота основного канала

Пропускная способность на линию	Тактовая частота передачи «symbol»
1,62 Гбит/с	162 МГц
2,7 Гбит/с	270 МГц
5,4 Гбит/с	540 МГц

В качестве единицы передачи информации в стандарте принято обозначение «symbol». За «symbol» принимается 8 бит данных, кодируемых до момента их передачи в 10 бит в соответствии с пунктом 11 стандарта ANSI X3.230-1994, чем и объясняется представленная зависимость.

²VESA and Industry Standards and Guidelines for Computer Display Monitor Timing (DMT) Version 1.0, Rev. 13, 2013. URL: <https://glenwing.github.io/docs/VESA-DMT-1.13.pdf>. (дата обращения: 11.02.2022).

В связи с возможностью выбора количества линий передачи данных основного канала, различных форматов видео (720x480 чересстрочное, 60 Гц; 1280x720 прогрессивное, 60 Гц; и др.) и поддержки минимального количества линий стандарт предусматривает наличие функции изменения (увеличение/уменьшение) количества активных линий. Алгоритмы работы функции изменения количества активных линий представлен на рис. 2 и 3. Принцип работы функции изменения:

1) Увеличение количества активных линий (для режимов с 1 линией и 2 линиями).

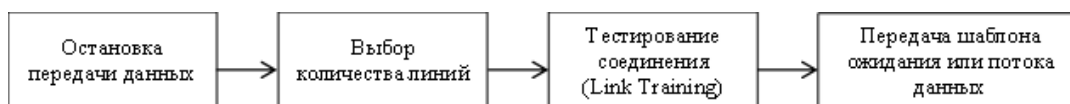


Рис. 2. Алгоритм увеличения количества активных линий

Fig. 2. Algorithm for increasing the number of active lines

Шаблом ожидания, согласно стандарту, называется последовательность данных, пересылаемая по активной линии, в отсутствие потоковых данных. Под активной линией передачи данных подразумевается линия основного канала, используемая для передачи данных.

2) Уменьшение количества активных линий (для режимов с 2 и 4 линиями)

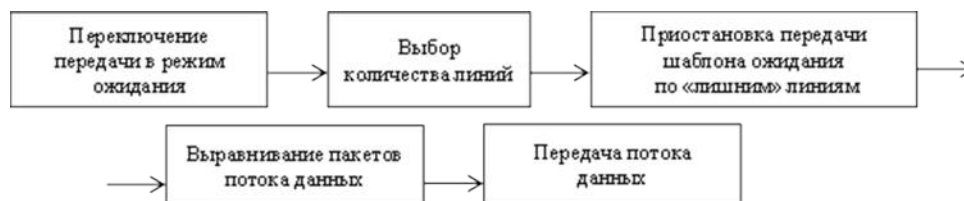


Рис. 3. Алгоритм уменьшения количества активных линий

Fig. 3. Algorithm for reducing the number of active lines

Стоит отметить, что при изменении количества активных линий не изменяются значения битовой глубины пикселя, битовой глубины компонента и формата колориметрии RGB, YCbCr в том числе с различной цветовой субдискретизацией 4:4:4/4:2:2.

Вследствие того, что количество активных линий влияет на изменение тактовой частоты передачи данных СВТ с интерфейсом DisplayPort, то на этапе подготовки к лабораторным исследованиям следует:

- 1) провести анализ EDID и уточнить характеристики используемого монитора;
- 2) выбрать режим(ы) работы, для исключения неконтролируемой смены количества активных линий;
- 3) оценить количество активных линий при использовании выбранных режимов работы;
- 4) определить тактовую частоту на линию для каждого выбранного режима работы.

Определив основные характеристики режимов работы СВТ с интерфейсом DisplayPort, следует проанализировать его архитектуру и определить компоненты, влияющие на проведение лабораторных исследований по техническому каналу ПЭМИН.

1.2 Архитектура интерфейса

Архитектура интерфейса DisplayPort содержит два основных уровня: канальный и физический. Канальный уровень обеспечивает требуемые свойства изохронной передачи данных, основанной на архитектуре микропакетов, управление соединением и устройствами по каналу AUX CH и тактирование приемника сигнала. Физический уровень определяет

физические свойства соединения между источником и приемником, электрические характеристики интерфейса и процедуры подготовки данных к передаче. Взаимодействие источника и приемника обусловлено физической средой распространения сигнала. Общий принцип архитектуры интерфейса DisplayPort приведен на рис. 4.



Рис. 4. Общий принцип архитектуры интерфейса DisplayPort
Fig. 4. The general principle of the DisplayPort interface architecture

В целях анализа компонентов архитектуры интерфейса, с точки зрения влияния на проведение лабораторных исследований по техническому каналу ПЭМИН, необходимо сформировать исследовательский стенд, который позволит экспериментально оценить работу интерфейса DisplayPort и его энергетический спектр.

1.2.1 Описание исследовательского стенда

При проведении инструментального контроля защищенности СВТ, связанного с определением максимального расстояния, на котором возможно осуществить восстановление информации за счет анализа характеристик ПЭМИ, прежде всего, оценивают критические условия эксплуатации. Как правило, критические условия определяются минимальным уровнем мощности электромагнитного шума или помех и максимальным уровнем мощности сигнала в окружающем пространстве от исследуемого интерфейса. Минимальный уровень мощности электромагнитного шума достигается особыми условиями проведения испытаний, например выбором времени их проведения, или при использовании альтернативной измерительной площадки (АИП).

В ходе эксперимента, связанного с анализом ПЭМИ интерфейса DisplayPort, в качестве АИП использовалась безэховая экранированная камера со следующими характеристиками:

- 1) в соответствии с ГОСТ 30373-95 имеет I класс экранирования в диапазоне от 10 кГц до 40 ГГц;
- 2) соответствует требованиям ГОСТ 53120-99 в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц;
- 3) размеры в единицах метров (длина, ширина, высота): 10,29*5,85*4,16.

В качестве исследуемого объекта использовалось СВТ с интерфейсом DisplayPort со следующими составляющими:

- 1) монитор AOC 2475W1 с характеристиками, полученными с помощью программного обеспечения для создания и редактирования файлов Extended Display Identification Data – AW EDID Editor, рис. 5.
- 2) операционная система – Windows 10;
- 3) материнская плата – Asus Prime B250M-C;
- 4) версия BIOS – 1050 PC 14.34;
- 5) видеоадаптер – Intel Skylake-S GT2.

Исследуемое СВТ размещается на диэлектрическом поворотном столе на высоте 80 см от пола, интерфейсный кабель DisplayPort располагается без перекручивания и выпрямлен по всей своей длине. Для исключения возможного появления помех в АИП отсутствуют иные СВТ, что повышает точность результатов эксперимента. Пример расположения монитора представлен на рис. 6.

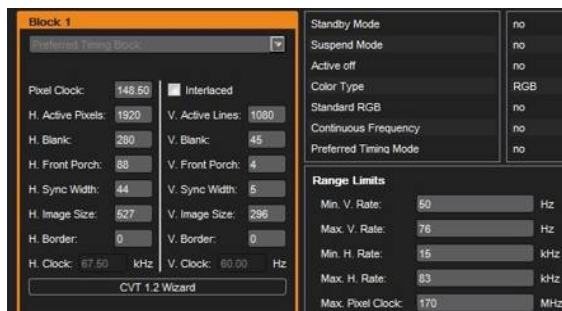


Рис. 5. Характеристики монитора
Fig. 5 Characteristics of the monitor



Рис. 6. Расположение монитора
Fig. 6. Location of the monitor

Оценивая характеристики монитора, можно заметить, что пиксельная частота численно равна 148,5 МГц и не соответствует ни одному из приведенных выше значений. Связано это с тем, что в архитектуре интерфейса DisplayPort нет отдельного тактового канала и, поэтому для корректного приема видеосигнала используется механизм восстановления пиксельной частоты, а также количество бит, содержащих информацию об одном пикселе больше 8 бит. В соответствии со спецификацией определяется количество бит на пиксель в зависимости от формата колориметрии:

- 1) для формата RGB: 18 бит, 24 бит, 30 бит и 36 бит на пиксель;
- 2) для формата $YCbCr$ (4:2:2): 16 бит, 20 бит, 24 бит и 32 бит на пиксель;
- 3) для формата $YCbCr$ (4:4:4): 24 бит, 30 бит, 36 бит и 48 бит на пиксель.

Количество бит на пиксель для отдельного монитора можно посмотреть по следующему пути реестра операционной системы Windows: `HKEY_LOCAL_MACHINE\SYSTEM\CurrentControlSet\Control\UnitedVideo\CONTROL\VIDEO\{ID}\{номер порта – 0000}` и ключу `DefaultSettings.BitsPerPel`.

В качестве измерительного приемника использовался анализатор спектра и сигналов Rohde Schwarz FSW 13 с диапазоном частот от 2 Гц до 13,6 ГГц. Для поиска информативных частот интерфейса DisplayPort использовались дипольная антенна АИ5-0 для диапазона от 9 кГц до 2 ГГц, АШН-5 и АШН-6 для диапазона от 2 ГГц до 13,6 ГГц. Все представленные в работе эксперименты и графики получены на представленном оборудовании и АИП.

1.2.2 Физическая среда распространения сигнала

Средой распространения сигнала между источником и приемником является интерфейсный кабель. Согласно спецификации интерфейса DisplayPort 1.2 конструкция кабеля должна быть выполнена таким образом, чтобы его параметры экранирования и устойчивости к электромагнитным помехам соответствовали требованиям межгосударственных стандартов, относящихся к деятельности подкомитета CIS/B CISPR с запасом не менее 6 дБ.

Для оценки влияния принятых мер экранирования на мощность ПЭМИ поставлен следующий эксперимент. Для его проведения взято 2 одинаковых кабеля DisplayPort длиной 5 метров в штатной конфигурации и без слоя экранирующих материалов. В ходе эксперимента были обнаружены спектральные компоненты монитора с интерфейсом

DisplayPort в частотном диапазоне до 2,5 ГГц. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.

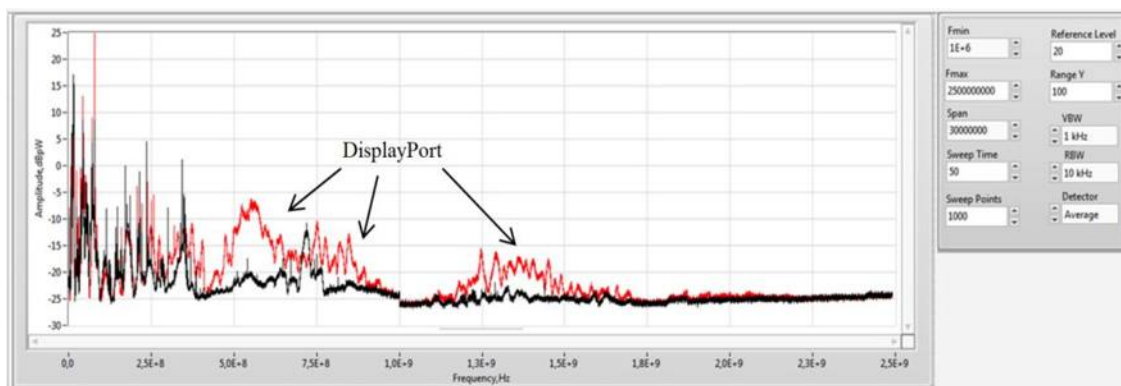


Рис. 7. Результаты эксперимента
Fig. 7. The experiment results

По полученным результатам видно, что принятые меры к экранированию кабеля способствуют уменьшению мощности ПЭМИ, а соответственно их нарушение приводит к критичным условиям эксплуатации. Отсутствие экранирования не влияет на передаваемый сигнал в лабораторных условиях.

Несмотря на результаты эксперимента, деструктивное исследование приводит к нарушению целостности кабеля, отклонению от штатной (заводской) конфигурации интерфейса и снижению уровня помехозащищенности каналов передачи данных, что недопустимо при реальных условиях эксплуатации.

Тем не менее, при подготовке к лабораторным испытаниям специалистам следует убедиться, что кабель не имеет физических повреждений и экранирующий слой не нарушен.

1.2.2.1 Модуляция сигнала

Анализируя график огибающей спектра интерфейса DisplayPort, представленный на рис. 7, можно заметить, что в отличие от интерфейса HDMI спектр сигнала «размыт» по частотам. В соответствии со стандартом для достижения такого эффекта при преобразовании сигнала используется частотная модуляция с расширенным спектром (SSFM). Данный вид частотной модуляции применяется для уменьшения уровня электромагнитных помех при передаче сигнала и эффективно снижает пиковую амплитуду на несущей частоте и ее гармонических частотах [15]. Частота модуляции, применяемая в интерфейсе DisplayPort, определена в диапазоне от 30 кГц до 33 кГц.

Для того чтобы оценить мощность сигнала с достаточной полнотой, необходимо измерить его фильтром равным полосе сигнала, при этом мощности «размытого» и «не размытого» сигналов окажутся одинаковыми. Тем не менее, оборудование, которое позволяет выполнить такую работу, имеет достаточно высокую цену или вовсе недоступно многим лабораториям по причинам ограничения экспортного контроля. Несмотря на это, в конфигурации DPSCD возможно отключить применяемое преобразование. Отключение модуляционного преобразования позволит уже разработанными автоматизированными методами обнаружить спектральные компоненты интерфейса DisplayPort и соответственно провести измерение мощности сигнала.

1.2.3 Физический уровень

Физический уровень обеспечивает подготовку к передаче данных и тестирует соединение на наличие ошибок. Функциональная схема физического уровня приведена на рис. 8.

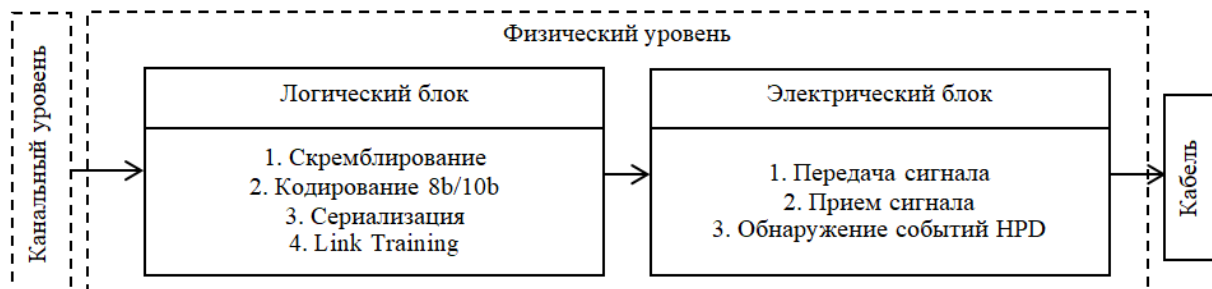


Рис. 8. Физический уровень интерфейса DisplayPort
Fig. 8. Physical layer of the DisplayPort interface

Исходя из функциональной схемы, поток данных поступает на логический блок физического уровня после выполнения функций канального уровня. Первой операцией основного канала в логическом блоке является скремблирование. В этот же момент на вспомогательном канале происходит инициализация соединения в режиме Link Training, в случае, если источник и приемник не синхронизированы. Канал HPD ожидает сигнала об изменении статуса соединения с приемником. Второй операцией основного канала является кодирование в соответствии со стандартом ANSI X3.230-1994. Далее кодированные данные проходят сериализацию.

В рамках инструментальных исследований осуществлять воздействие (отключение) на принимаемые производителем меры по обеспечению помехоустойчивости возможно только при условии отсутствия последующего нарушения работоспособности интерфейса и, как следствие, требований к имитации реальной эксплуатации СВТ. Изменение же принятых в стандарте функции кодирования 8b/10b и сериализации, определяющих порядок приема/передачи данных, может привести к ошибкам при обработке принимаемых данных и их частичной утрате. С этой точки зрения, анализ данных операций является не актуальным.

Тем не менее, с точки зрения формирования тестовой последовательности со скважностью передаваемого сигнала равной 2, кодирование 8b/10b определяет базовое требование: 8 бит/10 бит нулей и 8 бит/10 бит единиц. Порядок следования выполняемых операций относительно каналов передачи представлен на рис. 9.

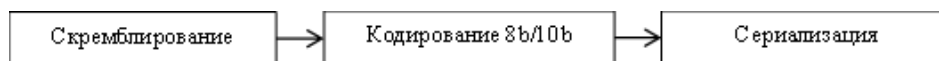


Рис. 9. Порядок выполнения операций на физическом уровне
Fig. 9. The procedure for performing operations at the physical level

Электрический блок осуществляет прием и передачу данных, выполняет функцию обнаружения событий HPD. Осуществление воздействий на электрический блок может привести к нарушению процесса передачи данных, что противоречит штатной работе рассматриваемого интерфейса. Таким образом, анализ функций электрического блока с точки зрения влияния на ПЭМИ является не актуальным. Далее рассмотрим подробнее функции скремблирования и режим Link Training.

1.2.3.1 Функция скремблирования

В соответствии со спецификацией интерфейса DisplayPort версии 1.2 скремблер реализован не на аппаратном уровне, а его применение приводит к уменьшению уровня мощности ПЭМИ информативного сигнала примерно на 7 дБ. Эталонная реализация скремблера на языке С представлена в приложении «Е» стандарта и включает в себя методы надежного обнаружения управляющего бита SR, приостанавливающего работу скремблера. Следовательно, можно предположить, что программными средствами можно управлять работой скремблера при передаче данных по интерфейсу DisplayPort. Например, осуществить изменение настроек DPCD, отвечающих за отключение скремблера, возможно, используя управляющие команды инструкций технологических компаний, например, таких как Intel³ и Altera⁴.

Дополнительно, для решения задачи отключения скремблера может быть разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с двумя разъемами DisplayPort – Male и Female. Функционально ПЛИС должно повторять приемно-передающее устройство по стандарту DisplayPort с ограниченным функционалом, позволяющим выполнить обратное преобразование скремблера на ПЛИС №1 и скремблирование на ПЛИС №2. Дополнительно ПЛИС должны поддерживать реализацию функций каналов AUX CH и HPD, а также функционал, выполняемый после этапа скремблирования. Предполагаемый принцип внедрения при лабораторных исследованиях показан на рис. 10, где разъем DisplayPort Male – DPM, разъем DisplayPort Female – DPF.



Рис. 10. Предполагаемый принцип использования ПЛИС
Fig. 10. The proposed principle of using a programmable logic integrated circuit

Основным недостатком использования решения с ПЛИС является наличие дополнительных электромагнитных помех. К тому же, для использования такого подхода требуется проведение тестирования функций ПЛИС, ее программного обеспечения в момент подготовки к лабораторным испытаниям, что увеличивает трудозатраты.

1.2.3.2 Режим Link Training

Настройка и тестирование соединения происходит с помощью определения параметров DPCD и их изменения в соответствии с возможностями приемника и источника. Благодаря процессу определения возможностей приемника и настройке канала связи источник и приемник DisplayPort избегают ошибок при передаче данных, согласовывают оптимальное количество линий и скорость передачи данных на линию для данного соединения.

³DisplayPort Intel® FPGA IP User Guide, 2021. URL: https://www.intel.com/content/www/programmable/us/en/literature/ug/ug_displayport.pdf (дата обращения: 21.02.2022).

⁴DisplayPort IP Core User Guide, 2016. URL: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/ja_JP/pdfs/literature/ug/ug_displayport.pdf (дата обращения: 21.02.2022).

Особенность режима Link Training в том, что при его работе не активен скремблер. С учетом того, что логика режима реализована в драйвере DisplayPort, то при изменении программного кода драйвера данный режим можно использовать для максимальной нагрузки линий по основному каналу. За основу кода с изменениями можно использовать репозиторий с открытым исходным кодом драйвера для режима Link Training интерфейса DisplayPort версии 1.2⁵, распространяющегося под публичной лицензией GNU. Недостатком данного подхода является то, что для его реализации требуется дополнительное функциональное тестирование изменений драйвера и оценка их влияния на передачу данных в штатном режиме.

1.2.4 Канальный уровень

Канальный уровень определяет формирование блоков данных, их порядок передачи и обеспечивает защищенность передаваемой информации посредством технологии High-bandwidth Digital Content Protection (HDCP) с поправками указанными в стандарте. В целях формирования тестовой последовательности, следующей правилу «8 бит/10 бит нули и 8 бит/10 бит единицы», необходимо рассмотреть функционал канального уровня, рис. 11.

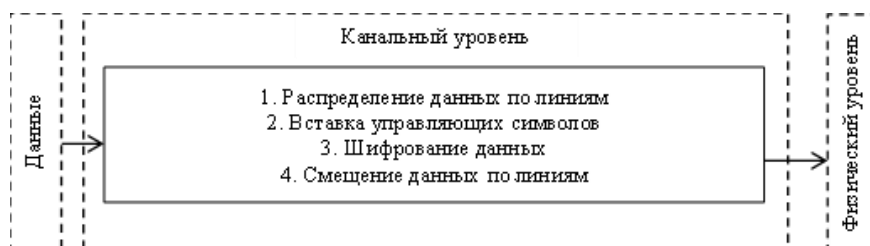


Рис.11. Канальный уровень интерфейса DisplayPort
Fig.11. Channel level of the DisplayPort interface

Исходя из функциональной схемы, поток данных поступает на канальный уровень, преобразуется в удобный для передачи и восстановления исходного изображения вид и передается на физический уровень. Первой операцией канального уровня является распределение данных по линиям. В случае одной линии все данные пересылаются только по ней. В случае двух линий, данные распределяются по законам: $2n$ для линии «0» и $2n + 1$ для линии «1», где n – номер линии. Для четырех линий по законам: $4n$ для линии «0», $4n + 1$ для линии «1», $4n + 2$ для линии «2» и $4n + 3$ для линии «3».

В целях кадрирования, разделения на транспортные блоки и уведомления приемника о типе пересылаемых данных в соответствии со стандартом применяется вставка управляющих символов.

Вставка управляющих символов происходит следующим образом:

1) Первый цикл на каждой линии содержит запись управляющего символа BE для указания места начала данных. Далее следует набор пересылаемых данных.

2) Применение операции заполнения нулевыми данными на каждой активной линии до размера транспортного блока. Транспортный блок содержит от 32 до 64 символов на линию и может менять размер в зависимости от передаваемого формата видео.

3) После последнего цикла добавления данных на всех линиях вставляется управляющий символ BS, показывающий место конца блока передачи.

⁵DisplayPort-link-training, 2016. URL: <https://github.com/ankishore/DisplayPort-link-training>. (дата обращения: 21.02.2022).

4) Уведомление о пересылке аудио, видео и их характеристиках реализовано с помощью управляющих символов Maud7:0, Mvid7:0 и VB-ID соответственно. При отсутствии передачи аудио или видео символы Maud7:0, Mvid7:0 сбрасываются в состояние 00h.

5) Далее на каждой линии следует поле свободных бит, либо заполненных фиктивными данными, либо аудиоданными, обрамленными управляющими символами FS и FE.

6) Транспортный блок окончен.

Для обеспечения защиты пересылаемых данных в стандарте предусмотрена операция шифрования на базе технологии HDCP версии 1.3. Для формирования тестовой последовательности, необходимо знать значение векторов инициализации приемника и источника сигнала, а также 64-битное число. Как правило, такие данные недоступны, из-за чего возникают трудности при формировании тестовой последовательности. Тем не менее, преодолеть это возможно с помощью пакета AMD Radeon Software или устройств HDCP-stripper.

В целях помехоустойчивости канала передачи применяется операция смещения данных между линиями. Первая линия не смещается, а каждая последующая относительно предыдущей линии смещается на два цикла заполнения символами. В случае появления внешних помех такой принцип позволяет исключить потерю символов одного типа для всех линий, например управляющих символов.

Результат базовых преобразований канального уровня, исключая шифрование, представлен на рис. 12, где серым цветом отмечены области фиктивных данных, Y1 (BE) и Y2 (BS, VB-ID, Mvid7:0, Maud7:0, FS, FE) обозначены области управляющих символов, П* и «.» – области данных и «0» – область заполненная нулями.

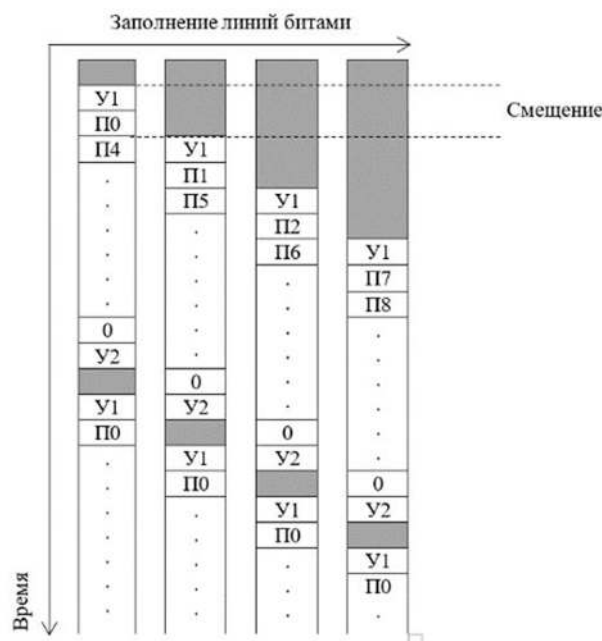


Рис.12 Состояние перед передачей на физический уровень
 Fig.12 The state before transmission to the physical layer

Таким образом, функцией влияющей на формирование тестовой последовательности является только операция шифрования на базе технологии HDCP версии 1.3. Результат же

работы функций распределения данных по линиям, вставки управляющих символов и смещения символов стоит учитывать при оценке влияния тестовой последовательности на мощность излучения.

2. Возможные подходы к анализу ПЭМИ

Из вышеприведенного следует, что подходы к анализу ПЭМИ интерфейса DisplayPort при условии создания критических условий касаются:

- 1) подготовительного этапа к лабораторным испытаниям;
- 2) отключения внутреннего функционала, не влияющего на работу интерфейса;
- 3) использования сведений для создания тестовой последовательности.

В табл. 3 представлены основное содержание подходов к анализу, результат их использования и недостатки по отношению к принятому порядку проведения лабораторных испытаний. Основным недостатком является функциональное тестирование результатов применяемых подходов, что автоматически приводит к увеличению трудозатрат проводимых исследований. Дополнительно, для обеспечения штатной работы СВТ после проведения лабораторных испытаний необходимо выполнить повторное включение всех отключенных функций, влияющих на ПЭМИ интерфейса DisplayPort, что также, хоть и незначительно, увеличивает трудозатраты.

Таблица 3. Подходы к анализу

Подход к анализу	Содержание подхода	Результат	Недостатки
Подготовительный этап к испытаниям	Анализ EDID	Уточнение характеристик монитора	Увеличение трудозатрат
	Выбор режима(ов) работы монитора	Исключение не контролируемой смены количества активных линий	
	Определение количества активных линий	Определение тактовой частоты передачи на линию	
Отключение внутреннего функционала	Передача данных при работе режима Link Training	Отключение скремблера	<ul style="list-style-type: none"> • Функциональное тестирование и оценка влияния на передачу данных в штатном режиме изменений драйвера • Повторный запуск • Увеличение трудозатрат
	Разработка ПАК на базе ПЛИС		<ul style="list-style-type: none"> • Наличие дополнительных электромагнитных помех • Тестирование функций ПЛИС и ее программного обеспечения • Повторный запуск • Увеличение трудозатрат
	Использование AMD Radeon Software, HDCP-stripper	Отключение HDCP	<ul style="list-style-type: none"> • Повторный запуск • Увеличение трудозатрат
	Анализ преобразования модуляции SSFM	Отключение SSFM	<ul style="list-style-type: none"> • Повторный запуск • Увеличение трудозатрат
Использование сведений для создания тестовой последовательности	Анализ порядка передачи символов	Формирование тестовой последовательности	<ul style="list-style-type: none"> • Тестирование влияния последовательности на работу интерфейса • Увеличение трудозатрат
	Оценка влияния тестовой последовательности на мощность излучения		

В соответствии с табл. 3 можно определить порядок анализа необходимой информации для применения подходов и последовательность применения инструментальных действий при подготовке к лабораторным исследованиям, что показано на рис. 13 и 14 соответственно.



Рис. 13. Порядок анализа необходимой информации
Fig. 13. The procedure for analyzing the necessary information

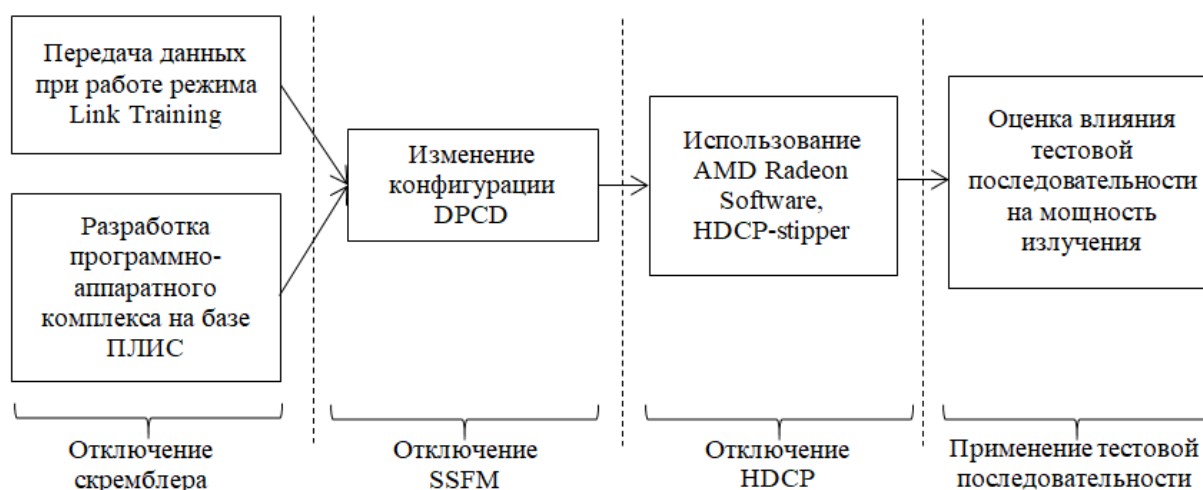


Рис. 14. Последовательность применения инструментальных действий
Fig. 14. The sequence of application of instrumental actions

Заключение

В данной статье проанализирована архитектура интерфейса DisplayPort 1.2 и описаны подходы к анализу излучения монитора с интерфейсом DisplayPort в рамках лабораторных исследований по техническому каналу ПЭМИН. На основании спецификации, определены характеристики интерфейса, влияющие на мощность побочного электромагнитного излучения: режим работы монитора, экранирующие материалы, скремблирование, шифрование данных и SSFM. По результатам исследования предложен порядок анализа необходимой информации для применения подходов и разработан порядок применения инструментальных действий при подготовке к лабораторным исследованиям, что позволит получить более точные значения мощности полезного сигнала при проведении контроля защищенности обрабатываемой информации СВТ с интерфейсом DisplayPort. Дальнейшее исследование будет направлено на апробацию описанных подходов при лабораторных исследованиях монитора с интерфейсом DisplayPort.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. M.G. Kuhn. Compromising emanations of LCD TV sets, in IEEE Transaction on electromagnetic compatibility. Vol. 55, no. 3, 2013, p. 564–570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2013.2252353>.
2. P. De Meulemeester, B. Sheers, G. A. E. Vandenbosch. Differential signaling compromises video information security through AM and FM leakage emissions, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 62, no. 6, p. 2376–2385, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2020.3000830>.
3. Ivanov A.V., Reva I.L., Ushakov A.E. Features of identification and the analysis of collateral electromagnetic radiations from USB flash drives, Proceedings of 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2016, p. 156–158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEIE.2016.7806436>.
4. Durakovskiy A.P., Kessarinskiy L.N., Simakhin E.A. Detection of compromising radiation from modern data transfer interfaces using the example of high definition multimedia interface, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1069(1), 7, ISSN 1757-8981, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1069/1/012026>.
5. R. Birukawa, D. Nagata, Y. -i. Hayashi, T. Mizuki and H. Sone. The Source Estimation of Electromagnetic Information Leakage from Information Devices, 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2020, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/URSIGASS49373.2020.9231979>.
6. T. Song, Y. Jeong, J. Yook. Modeling of Leaked Digital Video Signal and Information Recovery Rate as a Function of SNR, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 57, no. 2, 2015, p. 164–172. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2014.2372039>.
7. Sokolov R.I., Abdullin R.R., Dolmatov D.A. Development of Synchronization System for Signal Reception and Recovery from USB-Keyboards, Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911553>.
8. Degang Sun, Di Wei, Ning Zhang, Z Lv, Xi Yin. Network transmission of hidden data using smartphones based on compromising emanations, Proceedings of 7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016, p. 190–193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEMC.2016.7523005>.
9. P. De Meulemeester, B. Scheers, G. A. E. Vandenbosch. A Quantitative Approach to Eavesdrop Video Display Systems Exploiting Multiple Electromagnetic Leakage Channels, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 62, no. 3, p. 663–672, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2019.2923026>.
10. P. De Meulemeester, B. Scheers, G. A. E. Vandenbosch. Reconstructing Video Images in Color Exploiting Compromising Video Emanations, Proceedings of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. 2020, p. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245775>.
11. Голяков Александр А.; Дураковский Анатолий П.; Симахин Егор А. Применение генератора замещения для определения реального затухания информативных сигналов побочных электромагнитных излучений. Безопасность информационных технологий, [S.I.], т. 25, № 2, с. 38–53, 2018. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.2.03>.
12. I.I. Kagin, E.A. Simakhin, S.G. Arabian, L.N. Kessarinskiy and A.P. Durakovskiy. Development of a Software Package for the Analysis of Compromising Emanation Using LabVIEW, Proceedings of 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2021, p. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438939>.
13. A. Ivanov, I. Reva, Y. Baryshnikov. Development of hardware-software complex for automatized compromising electromagnetic emanation search, Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). 2016, p. 563–565. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884180>.
14. I. Kubiak, A. Przybysz. DVI (HDMI) and DisplayPort digital video interfaces in electromagnetic eavesdropping process, Proceedings of 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. 2019, p. 388–393. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEurope.2019.8872097>.
15. H. Jin, X. Rui, Z. Yunping. The Study of Reducing EMI in Power Electronic Converters Using SSFM Control Techniques, Proceedings of The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. 2006, p. 598–601. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CEEM.2006.258026>.

REFERENCES:

- [1] M.G. Kuhn. Compromising emanations of LCD TV sets, in IEEE Transaction on electromagnetic compatibility. Vol. 55, no. 3, 2013, p. 564–570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2013.2252353>.

- [2] P. De Meulemeester, B. Scheers, G. A. E. Vandenbosch. Differential signaling compromises video information security through AM and FM leakage emissions, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 62, no. 6, p. 2376–2385, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2020.3000830>.
- [3] Ivanov A.V., Reva I.L., Ushakov A.E. Features of identification and the analysis of collateral electromagnetic radiations from USB flash drives, Proceedings of 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2016, p. 156–158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEIE.2016.7806436>.
- [4] Durakovskiy A.P., Kessarinskiy L.N., Simakhin E.A. Detection of compromising radiation from modern data transfer interfaces using the example of high definition multimedia interface, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1069(1), 7, ISSN 1757-8981, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1069/1/012026>.
- [5] R. Birukawa, D. Nagata, Y. Hayashi, T. Mizuki and H. Sone. The Source Estimation of Electromagnetic Information Leakage from Information Devices, 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2020, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/URSIGASS49373.2020.9231979>.
- [6] T. Song, Y. Jeong, J. Yook. Modeling of Leaked Digital Video Signal and Information Recovery Rate as a Function of SNR, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 57, no. 2, 2015, p. 164–172. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2014.2372039>.
- [7] Sokolov R.I., Abdullin R.R., Dolmatov D.A. Development of Synchronization System for Signal Reception and Recovery from USB-Keyboard, Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911553>.
- [8] Degang Sun, Di Wei, Ning Zhang, Z Lv, Xi Yin. Network transmission of hidden data using smartphones based on compromising emanations, Proceedings of 7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016, p. 190–193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEMC.2016.7523005>.
- [9] P. De Meulemeester, B. Scheers, G. A. E. Vandenbosch. A Quantitative Approach to Eavesdrop Video Display Systems Exploiting Multiple Electromagnetic Leakage Channels, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 62, no. 3, p. 663–672, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2019.2923026>.
- [10] P. De Meulemeester, B. Scheers, G. A. E. Vandenbosch. Reconstructing Video Images in Color Exploiting Compromising Video Emanations, Proceedings of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. 2020, p. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245775>.
- [11] Golyakhov Alexander A.; Durakovskiy Anatoly P.; Simakhin, Egor A. Use of generator substitution to determine the real attenuation of informative signals in the compromising emanation. IT Security (Russia), [S.l.], vol. 25, no. 2, p. 38–53, 2018. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.2.03> (in Russian).
- [12] I.I. Kagin, E.A. Simakhin, S.G. Arabian, L.N. Kessarinskiy and A.P. Durakovskiy. Development of a Software Package for the Analysis of Compromising Emanation Using LabVIEW, Proceedings of 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2021, p. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438939>.
- [13] A. Ivanov, I. Reva, Y. Baryshnilov. Development of hardware-software complex for automatized compromising electromagnetic emanation search, Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). 2016, p. 563–565. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884180>.
- [14] I. Kubiak, A. Przybysz. DVI (HDMI) and DisplayPort digital video interfaces in electromagnetic eavesdropping process, Proceedings of 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. 2019, p. 388–393. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMCEurope.2019.8872097>.
- [15] H. Jin, X. Rui, Z. Yunping. The Study of Reducing EMI in Power Electronic Converters Using SSFM Control Techniques, Proceedings of The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. 2006, p. 598–601. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CEEM.2006.258026>.

*Поступила в редакцию – 11 января 2022 г. Окончательный вариант – 02 марта 2022 г.
Received – January 11, 2022. The final version – March 02, 2022.*