

УДК 681.51

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-729-738

## ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ БЕСПРОВОДНЫХ ПЕРСОНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.Я. Афанасьев<sup>a</sup>, Ю.В. Федосов<sup>a,b</sup>, А.А. Крылова<sup>a,c</sup>, С.А. Шорохов<sup>a</sup>, К.В. Зименко<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация

<sup>c</sup> ООО «ЛАР Технологии», Санкт-Петербург, 197342, Российская Федерация

Адрес для переписки: ananasn94@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 16.06.20, принята к печати 07.08.20

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В., Крылова А.А., Шорохов С.А., Зименко К.В. Помехозащищенность беспроводных персональных сетей в условиях цифрового производства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 729–738. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-729-738

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследовано влияния факторов производственной среды на беспроводные персональные сети. Представлена их классификация, определена помехозащищенность беспроводных персональных сетей на примере реального производства. **Метод.** Предложен способ оценки помехозащищенности на основе показателя уровня принимаемого сигнала, значения которого можно получить нативно с любых приемников и передатчиков, что делает этот способ доступным по сравнению с использованием сетевых анализаторов и другого специализированного оборудования. В проводимом эксперименте приемник и передатчик располагались друг от друга на разных расстояниях в диапазоне 0,5–25 м. Акт передачи проводился поочередно под влиянием каждого из факторов производственной среды. Измеренные значения показателя уровня принимаемого сигнала анализировались и преобразовывались в максимально допустимое расстояние между приемником и передатчиком в соответствии с предложенным способом. **Основные результаты.** Получены данные о влиянии производственной среды на помехозащищенность беспроводных персональных сетей, к которым относятся: опоясывающие толстостенные стальные препятствия, сварочные аппараты и сети аналогичного частотного диапазона. Сделан вывод о том, что влияние не настолько значительное, чтобы отказываться от применения беспроводных персональных сетей, так как воздействие многих факторов может быть нивелировано применением ячистой топологии и плотным расположением приемников и передатчиков. **Практическая значимость.** Результаты работы особенно интересны в контексте цифровизации производства, где из-за требования к гибкости и мобильности производственного процесса беспроводной способ передачи данных с датчиков полевого уровня становится предпочтительнее проводного.

### Ключевые слова

цифровое производство, производственная среда, беспроводные персональные сети, оценка помехозащищенности, показатель уровня принимаемого сигнала, силовое оборудование

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-729-738

## NOISE IMMUNITY OF WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS UNDER DIGITAL PRODUCTION CONDITIONS

M.Ya. Afanasiev<sup>a</sup>, Yu.V. Fedosov<sup>a,b</sup>, A.A. Krylova<sup>a,c</sup>, S.A. Shorokhov<sup>a</sup>, K.V. Zimenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> Russian Institute for Power Radioengineering (JSC RIPR), Saint Petersburg, 199048, Russian Federation

<sup>c</sup> LLC Lar Technologies, Saint Petersburg, 197342, Russian Federation

Corresponding author: ananasn94@gmail.com

### Article info

Received 16.06.20, accepted 07.08.20

Article in Russian

**For citation:** Afanasiev M.Ya., Fedosov Yu.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A., Zimenko K.V. Noise immunity of wireless personal area networks under digital production conditions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 729–738 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-729-738

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper considers the effect of working-environment factors on wireless personal networks. A classification of such factors is given and the noise immunity of wireless personal networks is determined on a real production example. **Method.** A method for noise immunity evaluation was proposed based on a received signal strength indicator (RSSI). RSSI values can be obtained natively from almost any receiver and transmitter, that makes this method affordable compared to application of network analyzers and other specialized equipment. In the carried out experiment the receiver and transmitter were located at a distance ranging from 0.5 to 25 m. The act of signal transfer was carried out alternately under the impact of each working-environment factor. Then the measured RSSI values were analyzed and converted into the maximum permissible distance between the receiver and the transmitter in accordance with the proposed method. **Main Results.** Data on the working-environment effect on the noise immunity of wireless personal networks is obtained. The most significant factors are: girded thick-walled steel obstacles, welding machines and similar frequency range networks. Nevertheless, it is concluded that the effect is not significant enough to decide against the application of wireless personal networks, since the exposure of many factors can be offset by the use of mesh topology and dense arrangement of receivers and transmitters. **Practical Relevance.** The results are of particular interest in the context of production digitization, where the wireless method of data transmission from the field level sensors becomes preferable to the wired one due to the requirement for flexibility and mobility of a production process.

**Keywords**

digital production, industrial environment, wireless personal area network, noise immunity evaluation, received signal strength indicator, power electronic equipment

**Введение**

Промышленное производство неизменно считается наукоемким и высокотехнологичным направлением деятельности человека. Начиная с появления паровых машин в начале XVIII века, производство прошло через три промышленные революции, вбирая в себя новые технологии. Современная промышленность находится у следующей ступени развития (Индустрия 4.0) и претерпевает цифровую трансформацию. Развитие технологий промышленного интернета вещей и промышленных киберфизических систем привело к появлению новой концепции — цифровое производство. Основной идеей цифрового производства является глубокая интеграция компьютерных технологий в производственный процесс, позволяющая создавать цифровые модели (или «цифровые двойники») и воздействовать на них в реальном времени. Однако для проведения подобного моделирования необходимы полные и актуальные данные обо всех элементах и участниках производственного процесса. В настоящее время активно разрабатываются системы класса MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition), позволяющие собирать данные такого рода. Вместе с ними развиваются и другие системы, которые позволяют не только осуществлять сбор данных, но и обеспечивать межмашинное взаимодействие (Machine-to-Machine, M2M) на нижних уровнях производства. Внедрение вышеуказанных систем на производстве сопровождается созданием соответствующей сетевой инфраструктуры.

Развертывание сетевой инфраструктуры влечет за собой значительные финансовые, трудовые и временные издержки, поэтому многие компании не торопятся переходить на цифровое производство, ожидая подходящего решения, которое позволило бы минимизировать эти издержки. Вместе с этим меняется рынок товаров и услуг, и подходы, которые использовались раньше при организации производственного процесса, устаревают [1]. Производство становится более персонализированным, что приводит к появлению нового подхода — «производство как услуга». В результате возникает необходимость обеспечения гибкости и мо-

бильности производственного процесса. Исходя из этого, применение беспроводных сетей оказывается предпочтительным, поскольку приводит к меньшим издержкам [2], а также обеспечивает выполнение новых требований, предъявляемых к организации производственного процесса.

На производстве существует множество факторов, которые могут сказываться на помехозащищенности беспроводного сигнала, поэтому проводятся различные исследования влияния производственной среды на беспроводной сигнал, и определяются критерии его оценки. Так, например, ученые Линчепингского университета и университета Евле в Швеции оценили влияние электромагнитного шума в цехах для различных частотных диапазонов беспроводного сигнала [3, 4]. В своем исследовании они определили профиль задержки мощности в различных помещениях на производстве, отличающихся по характеру отражения и поглощения сигнала. Похожие исследования проводились и в Пекинском университете Цзяотун [5], где определялись амплитудные и временные характеристики электромагнитного шума в диапазонах 315, 433 и 916 МГц, возникающих в ходе эксплуатации сварочного робота. В работе<sup>1</sup> приводится описание установки для проведения измерений параметров беспроводного сигнала диапазона 2,4 ГГц, а также методика измерений. Используя данную установку, ученые получили зависимость стабильности беспроводного сигнала от времени, необходимого на передачу пакета стандарта<sup>2</sup>. Работа [6] затрагивает вопрос зашумления диапазона 2,4 ГГц другими сетями и источниками помех. В ней предлагается математическая модель электромагнитного шума в этом диапазоне, которая может использовать-

<sup>1</sup> Girs Svetlana et al. Design of Channel Measurement Guidelines for Characterization of Wireless Industrial Environments [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:638002/FULLTEXT02.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rovdo.com/ieee-802-15-4-networks>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).

ся для предварительной оценки помехозащищенности на производстве.

### Беспроводные персональные сети

Производство принято представлять как иерархическую систему, состоящую из уровней (рис. 1). На каждом уровне присутствуют элементы сетевой инфраструктуры, обеспечивающие как горизонтальную, так и вертикальную передачу данных. При этом от уровня к уровню типы применяемых вычислительных сетей меняются. Это происходит из-за того, что в зависимости от положения в иерархической системе выдвигаются различные требования к скорости передачи данных, защищенности, ширине канала, топологии, надежности и энергоэффективности. Более того, в зависимости от выполняемых задач, на одном уровне могут сосуществовать различные вычислительные сети. Из этого следует, что сетевая инфраструктура предприятия является гибридной.

Для того чтобы понять на каких уровнях функционирует беспроводная персональная сеть, нужно определить «цифровых двойников», которые оперируют передаваемыми в сети данными. Например, данные, получаемые от станка с числовым программным управлением и/или от установленных на него датчиков, могут применяться для создания «цифрового двойника» этого оборудования. Также хорошим примером может послужить ситуация, когда для некоторых технологических операций в цеховом помещении необходимо поддерживать определенную температуру и влажность. В этом случае данные будут использоваться для «цифрового двойника» цехового помещения.

Беспроводные персональные сети (Wireless personal area network, WPAN) применяются на уровнях системы управления, оборудования, производственной ячейки, цеха и, реже, в случае малых производств, на уровне предприятия. Такой охват и возможность применения в производственной среде они получили по причине активной поддержки комитетом IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), что способствовало получению целого ряда технологий, охватываемых набором стандартов<sup>1</sup>. К ним относятся известные технологии — Bluetooth, Zigbee и Thread. Вместе с тем быстрыми темпами наращивается аппаратная база. Сейчас на рынке присутствует большой выбор чипов и готовых плат, поддерживающих сразу несколько технологий WPAN. Несмотря на изначально небольшую дальность прохождения сигнала, применение ячеистой топологии позволяет достигнуть практически неограниченного радиуса действия. Также стоит отметить возможность построения WPAN со стеком TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), что является удобным при совместной работе с другими сетями.

К основным достоинствам WPAN можно отнести сокращение издержек на проводную коммутацию. Это связано с тем, что часто производственные помещения

занимают очень большие площади (около 1 км<sup>2</sup>), а диспетчерские и аппаратные помещения сильно удалены от рабочих.

Реализация проекта по организации проводной сети, пуско-наладочных работ и обслуживания требует высокой квалификации персонала. Ввод в эксплуатацию проводной сети занимает больше времени, чем беспроводной, так как появляется необходимость прокладывать как сетевые кабели, так и кабели питания для коммуникационного оборудования.

Беспроводные сети с ячеистой топологией создают избыточность путей прохождения данных по сети, повышая отказоустойчивость сети в целом. Появляется возможность простого масштабирования беспроводных сетей, которые являются энергоэффективными благодаря существующим протоколам обмена, например, стандарта<sup>2</sup>.

К недостаткам WPAN можно отнести то, что диапазоны частот, в которых функционируют такие сети — 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц — в России являются нелицензируемыми и имеют ограничения на мощность передатчика<sup>3</sup>. Такие диапазоны носят название «ISM-частот» (Industrial Scientific Medical). Как следует из названия, в таких диапазонах частот работает достаточно большое количество оборудования, что может вносить помехи в работу сети [7, 8].

### Оценка помехозащищенности беспроводного сигнала

На производстве существует множество факторов, которые могут ослаблять и искажать беспроводной сигнал. Определение этих факторов перед процедурой развертывания беспроводной сети является важным мероприятием. На рис. 2 представлена классификация таких факторов по основным признакам. При проектировании нового предприятия многие из указанных факторов можно определить еще на этапе разработки схемы размещения оборудования и компоновки подразделений. Например, тип среды можно определить по функциональному назначению помещения. А зная готовую компоновку подразделений, возможно выявить, где офисные Wi-Fi-сети 2,4 ГГц будут пересекаться с производственной беспроводной сетью. Учитывая это, есть возможность провести корректировки для того, чтобы повысить помехозащищенность сети.

Однако более актуальной в данный момент задачей является внедрение беспроводной сети на уже функционирующем производстве. Кроме того, для получения более точной картины необходимы измерения непосредственно на предприятии. Существуют различные характеристики, которые используются для определения качества сигнала. К ним относятся: профиль ослабления мощности, амплитудные и временные

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rovdo.com/ieee-802-15-4-networks>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rovdo.com/ieee-802-15-4-networks>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>3</sup> Заседание ГКРЧ от 28.04.2008 (Протокол № 08-24) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4035/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).



Рис. 1. Уровни производственной системы



Рис. 2. Факторы ослабления беспроводного сигнала на производстве

характеристики, соотношение сигнал-шум (Signal to Noise Ratio, SNR) [9] и т. д. К сожалению, получение значений этих характеристик требует применения дорогостоящих приборов: анализатора спектра, векторного анализатора сети и специализированных антенн, а требования к квалификации человека, выполняющего такие измерения, оказываются очень высокими.

#### Методика исследования уровня помехозащищенности

В предлагаемой методике используется показатель уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI). Его основным достоинством является нативная поддержка практически на любом сетевом оборудовании, в том числе на используемой в эксперименте аппаратной платформе. Это означает, что получить значение RSSI можно от приемника без использования дополнительного измерительного оборудования. Тем не менее использовать RSSI напрямую для измерения качества беспроводного сигнала нельзя, поскольку этот параметр может содержать значительную составляющую помех. Другими словами, сильные помехи могут приводить к потере пакетов, одновременно повышая значение RSSI [10].

Значение отклонения  $\Delta RSSI$ , полученного как разница измеренного значения  $RSSI_p$  и теоретического  $RSSI_T$ :

$$\Delta RSSI = RSSI_T - RSSI_p. \quad (1)$$

При этом  $RSSI_T$  рассчитывают на основе характеристик антенн приемника и передатчика, а также учитывая частоту беспроводного сигнала и справочный параметр затухания среды:

$$RSSI_T = A - 10\mu \lg(d), \quad (2)$$

где  $d$  — расстояние до источника, м;  $\mu$  — экспонента затухания,  $\mu = 2$ ;

$$A = P_{\text{out}} + G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} - FSPL,$$

где  $P_{\text{out}}$  — выходная мощность передатчика, дБм;  $G_{\text{tx}}$  и  $G_{\text{rx}}$  — коэффициенты усиления антенны источника и приемника соответственно, дБи;  $FSPL$  — затухание в свободном пространстве, дБ;

$$FSPL = 10 \lg(d) + 20 \lg(f) + 20 \lg\left(\frac{4\pi}{c}\right),$$

где  $f$  — частота, Гц;  $c = 299792458$  м/с.

При проектировании сети, особенно ячеистой топологии, в первую очередь определяют то, как будут



располагаться узлы в помещениях. В зависимости от отклонения  $\Delta RSSI$  можно перейти к более удобному для такой задачи показателю – максимальному расстоянию между узлами  $D_{max}$ :

$$D_{max} = 10^{\frac{A - RSSI_T}{\mu^{10}}}$$

Сигнал со значением  $RSSI$ , меньше  $-80$  дБм, считается слабым<sup>1</sup>. Исходя из этого утверждения и выражения (1), можно рассчитать  $RSSI_T$ :

$$RSSI_T = -80 - \overline{\Delta RSSI}$$

на определенном расстоянии от передатчика, с учетом среднего отклонения  $\Delta RSSI$ , на величину которого влияют факторы конкретной производственной среды:

$$\overline{\Delta RSSI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta RSSI_i,$$

где  $n$  — количество проведенных измерений.

### План эксперимента

Эксперимент проводился с целью определения значимых факторов, ослабляющих беспроводной сигнал в производственной среде. Для этого необходимо было собрать экспериментальные данные, а также оценить помехозащищенность WPAN по разработанной методике под влиянием заданных факторов.

Измерения проводились с помощью экспериментальной установки, представленной на рис. 3.

В ее состав входят две платы на базе чипа nRF52840<sup>2</sup>, которые выступают в роли приемника и передатчика, на них установлены чип-антенны, характеристики которой указаны в табл. 1. Кроме того, используется персональный компьютер (ПК), на котором выполняется логирование данных. Для получения измеренных значений  $RSSI$  ПК соединяется с приемником по интерфейсу UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — универсальный асинхронный приемопередатчик). Внутри WPAN передача сообщения происходит по протоколу Thread<sup>3</sup>.

Эксперимент выполнен на территории производственных помещений компании «Лар Технологии», специализирующейся на создании технологического оборудования, и проводился отдельно под влиянием каждого фактора ослабления сигнала: фактор отражающей среды (склад металлопроката); наличие силового оборудования (асинхронные, шаговые двигатели, аппарат TIG-сварки (tungsten inert gas)); наличие препятствий (стальная толстостенная труба с толщиной стенки 20 мм). Исследования проводились при наличии

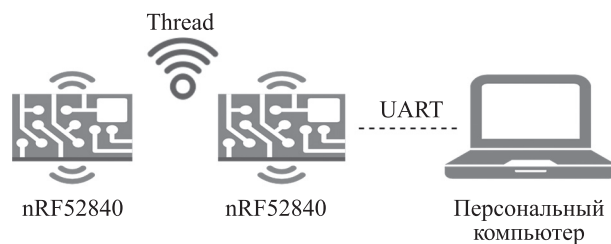


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Таблица 1. Спецификация чип-антенны ACA-2012-A1-CC-S

Характеристика	Значение
Диапазон частот, МГц	2400–2483
Коэффициент стоячей волны	менее 3,0
Поляризация	линейная
Входное сопротивление, Ом	50
Усиление, дБи	1,72
Габариты, мм	2,0 × 1,2 × 0,55

сетей 2,4 ГГц (сети Wi-Fi и Zigbee) и для сравнения измерения — на открытом пространстве без влияния перечисленных факторов.

Значения  $RSSI$  фиксировались на определенном расстоянии 0,5–24,5 м с шагом в 1 м. На каждом шаге проводилась серия замеров в течение одной минуты с периодом в 1 с. Для статистического анализа результатов эксперимента применен метод выборочных обследований.

### Результаты эксперимента

По мере увеличения расстояния между приемником и передатчиком значение  $RSSI$  уменьшается логарифмически в зависимости от теоретического значения  $RSSI_T$  (2).

Поскольку распространяемая волна имеет сферическую форму, то с увеличением расстояния энергия распределяется на возрастающую площадь поверхности сферы<sup>4</sup>. На рис. 4, а приведен график, отражающий теоретическую кривую значений  $RSSI$ , полученную в соответствии с (2), и зависимость  $RSSI$  от расстояния при измерении на открытом пространстве. Можно отметить, что кривые оказались схожими по форме. Однако имеются небольшие отклонения  $RSSI$  (рис. 4, б).

Одной из отличительных характеристик промышленного производства является тип среды, в которой должен распространяться беспроводной сигнал. Чаще всего производство характеризуется отражающей средой с определенными исключениями, например, целлюлозно-бумажные и деревообрабатывающие предприятия, где преобладают поглощающие среды. Распространение сигнала в отражающей среде подвер-

<sup>1</sup> Mobile Signal Strength Recommendations [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile\\_Signal\\_Strength\\_Recommendations1](https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile_Signal_Strength_Recommendations1), свободный. Яз. англ. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>2</sup> nRF52840 MDK USB Dongle [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://wiki.makerdiary.com/nrf52840-mdk-usb-dongle/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>3</sup> OpenThread protocol description [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openthread.io>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>4</sup> Линейная и круговая поляризация электромагнитных волн в системах RFID [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://asupro.com/gps-gsm/means-identification/automatic/linear-circular-polarization-rfid-system.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).

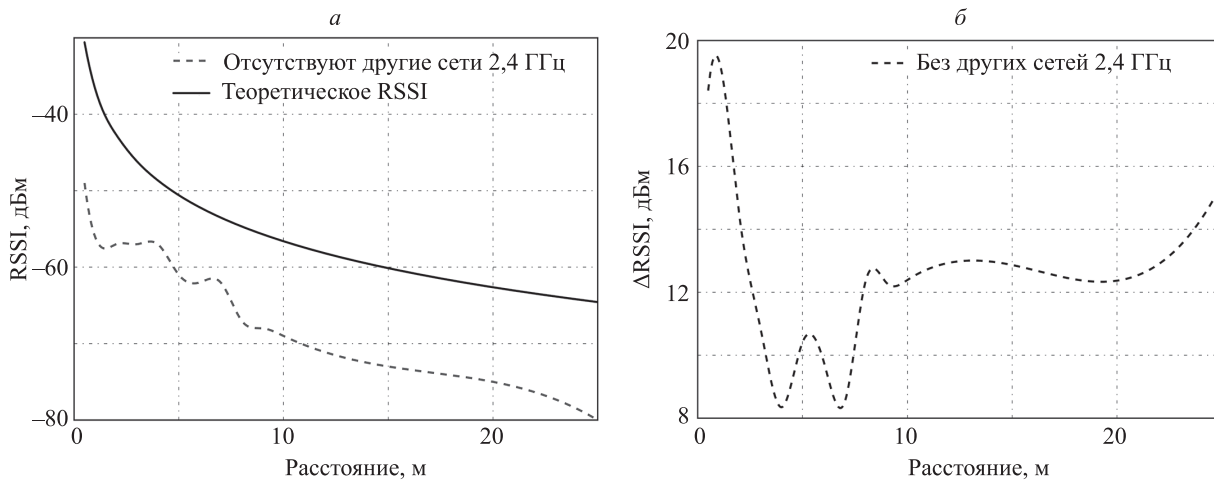


Рис. 4. Влияние открытого пространства и аппаратных особенностей приемника и передатчика на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

жено эффекту многолучевого распространения [11]. В результате осуществляется прием не только прямых лучей, но и отраженных, что приводит к флуктуации амплитуды, фазы и угла приема сигнала. На рис. 5 показаны графики зависимости RSSI и  $\Delta$ RSSI от расстояния соответственно. Очевидно, что на графиках присутствуют значительные флуктуации, порождаемые эффектом многолучевого распространения.

Препятствия, возникающие на пути распространения сигнала, оказывают аналогичное влияние. Кроме того, могут также проявляться явления дифракции (на поверхностях с резкими неровностями) и рассеяния (на шероховатых поверхностях). Стены между цехами и производственными ячейками, с одной стороны, могут отражать сигнал благодаря арматуре, а с другой, поглощать электромагнитные излучения из-за наличия шумоизоляции. Более того, на производстве встречаются ситуации, когда приемник или передатчик располагается только за определенным препятствием или внутри короба. На рис. 6 приведены данные для подобного случая. Полученный результат подобен представленному на рис. 5, однако отклонение RSSI больше, поскольку преграда имеет распределенный вид.

Так как производственная сетевая инфраструктура характеризуется гетерогенностью сетей, появляется вероятность одновременной работы нескольких беспроводных сетей в одном частотном диапазоне. В таком случае может наблюдаться явление интерференции. Происходит наложение когерентных волн друг на друга, что приводит к увеличению или снижению результирующей амплитуды. Такой эффект может особенно сильно проявляться, когда устройства работают на одном и том же канале, что характерно для диапазона 2,4 ГГц, где пересекаются каналы Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и Thread сетей [12]. В соответствии с графиками (рис. 7) становится очевидным значительное влияние этого фактора.

Множество силового оборудования, которое находится в цеховых помещениях, может исказить проходящий беспроводной сигнал и создавать помехи. Чаще всего это наблюдается, когда по силовым линиям оборудования распространяется импульсный сигнал. Это происходит по той причине, что при формировании фронта амплитуда сигнала изменяется с высокой скоростью, а это приводит к появлению в спектре сигнала большого количества высокочастотных гармоник.

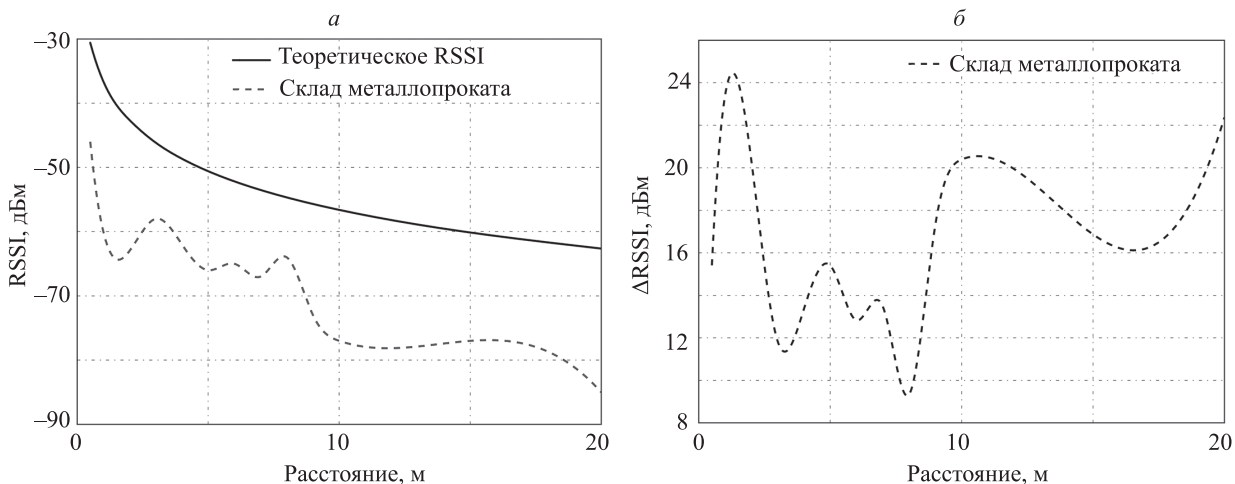


Рис. 5. Влияние отражающего характера пространства среды на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

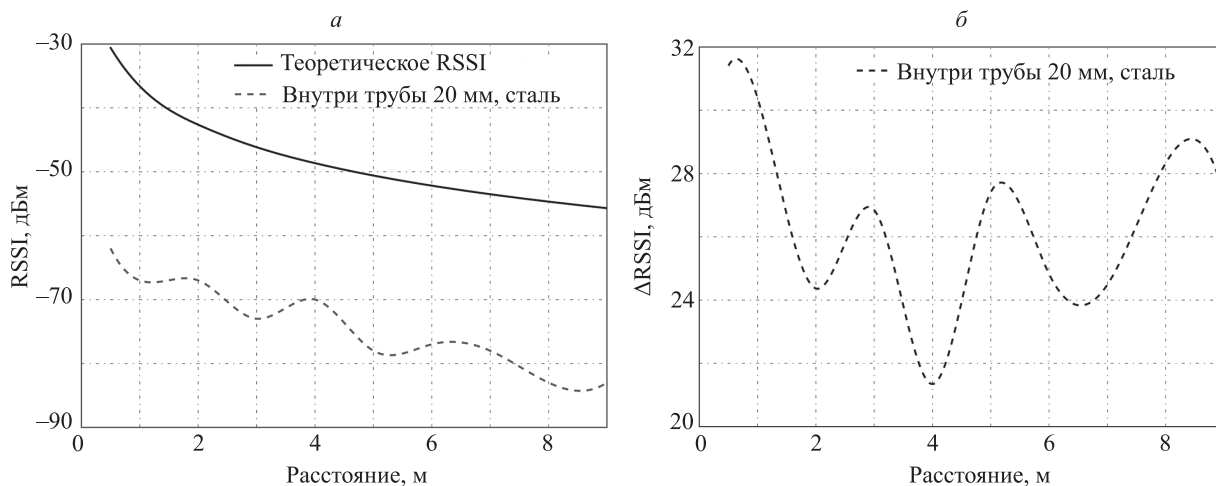


Рис. 6. Влияние препятствий в производственном помещении на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

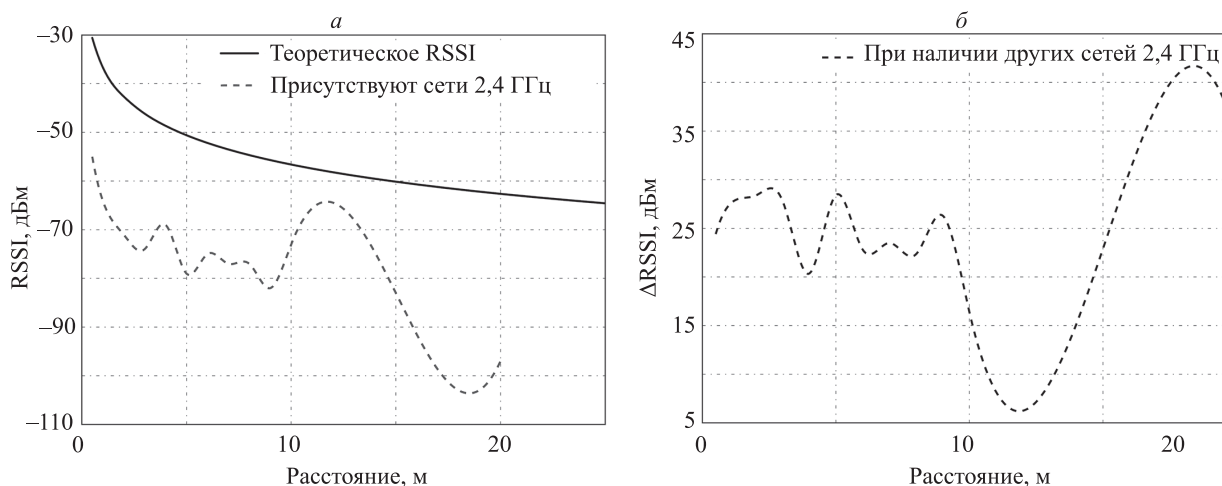


Рис. 7. Влияние соседних сетей 2,4 ГГц на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

Применение шагового двигателя, рассматриваемого в эксперименте, создает помехи, связанные с управлением двигателя посредством широтно-импульсной модуляции. Это приводит к искажению беспроводного сигнала (рис. 8). В случае асинхронного двигателя (рис. 9) сильных флуктуаций не наблюдается, поскольку управление таким двигателем осуществляется без применения частотных преобразователей.

В случае применения аппарата ТIG-сварки наблюдались наибольшие искажения сигнала (рис. 10), поскольку процесс сварки связан с переключением мощных транзисторных ключей инвертора и появлением затухающих высокочастотных колебаний<sup>1</sup>.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты экспериментов. Видно, что для производственных помещений, где располагается оборудование для металлообработки, необходимо обеспечить расположение

узлов беспроводной сети на расстоянии не более, чем 7 м друг от друга. Отклонение экспериментальных значений от теоретических скорее связаны с некоторыми особенностями антенны, неучтенными при расчете, а также усреднением значения экспоненты затухания. Стоит отметить, что организация ячеистой топологии беспроводных персональных сетей позволяет нивелировать отрицательные эффекты за счет плотного расположения узлов сети согласно рассчитанному  $D_{\max}$ .

В соответствии с ОНТП 14-93<sup>2</sup> оптимальная норма расстояния между технологическим оборудованием в механообрабатывающих цехах единичного и мелкосерийного производства составляет величину не более 2,6 м. Наиболее рациональным местом расположения узла беспроводной сети является тыльная сторона оборудования, которая согласно вышеуказанным нормам должна располагаться на расстоянии 0,5 м от цехового

<sup>1</sup> Переходные процессы в сварочных инверторах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/e03/e036d5c6f8c271c7ebbf44799619f068/201002052.pdf>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 31.05.2020).

<sup>2</sup> Нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки (доработка ОНТП-14-93). Механообрабатывающие сборочные цехи: утверждены Роскоммаш взамен ОНТП-14-86/Минстанкопром СССР.

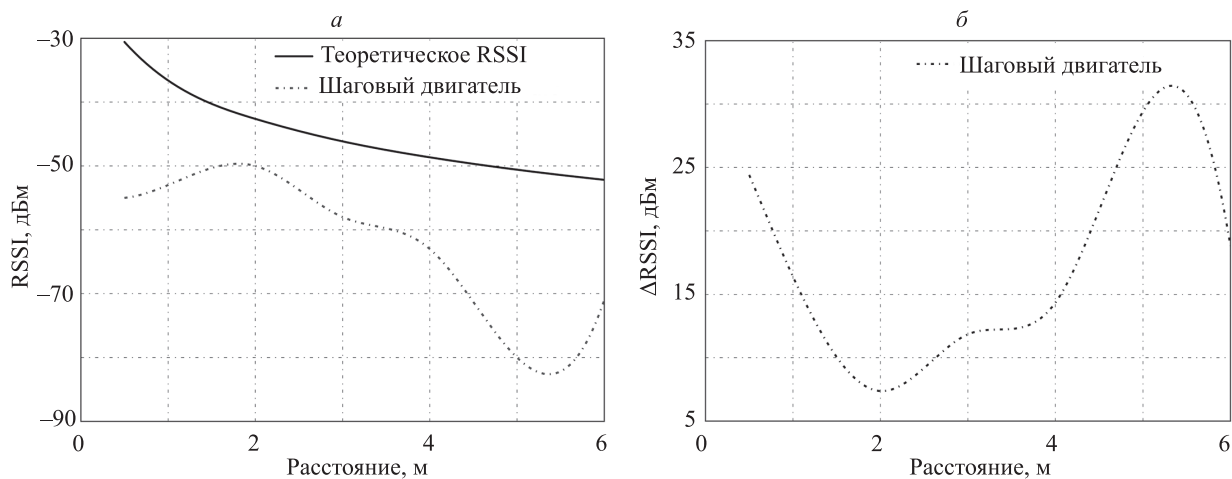


Рис. 8. Влияние работы шагового двигателя на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

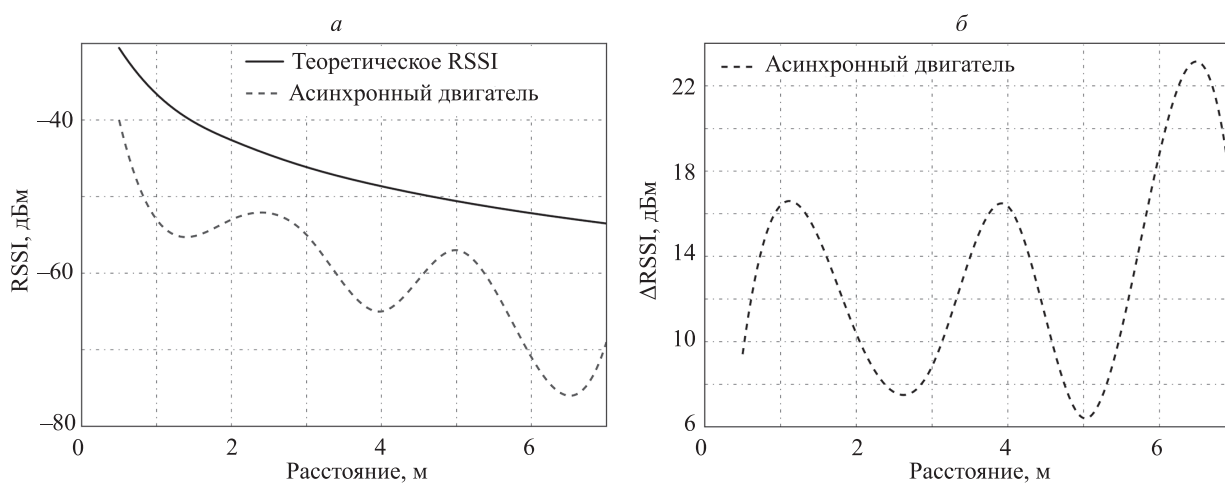


Рис. 9. Влияние работы асинхронного двигателя на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

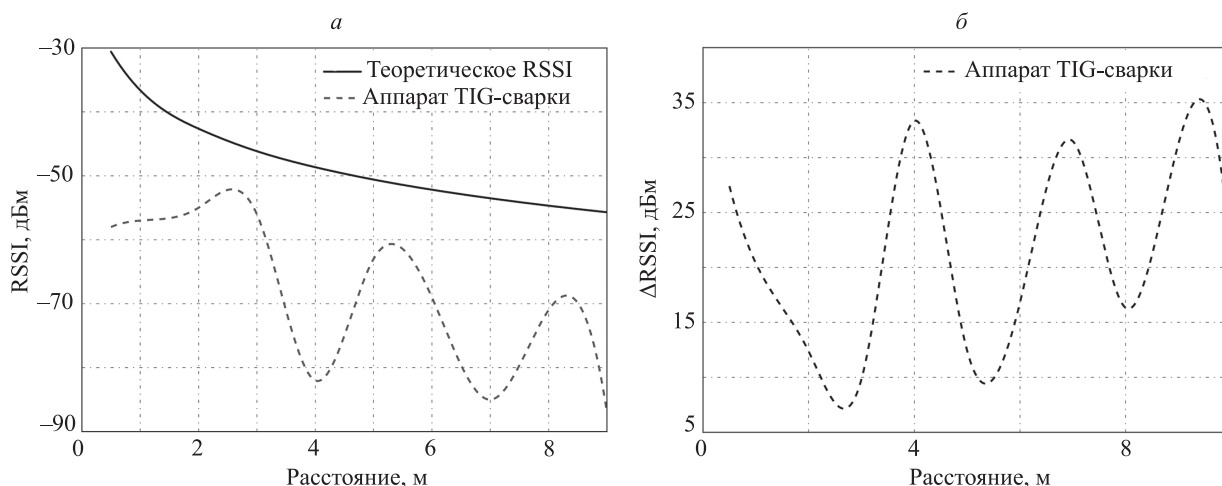


Рис. 10. Влияние работы аппарата TIG-сварки на значение RSSI (а) и отклонение  $\Delta$ RSSI от теоретического (б)

проезда. При этом для любых возможных конфигураций расположения оборудования в цеху максимальная ширина проезда составляет 4 м. Можно сделать вывод о том, что при расположении узлов, как в проезде, так и непосредственно на оборудовании, будет возмож-

но получить устойчивое соединение между узлами беспроводной сети при использовании ячеистой топологии. Последнее обусловлено тем, что при потере связи между узлами, расположенными в проезде, останется возможность прохождения сигнала непо-



Таблица 2. Сравнение факторов производственной сети на помехозащищенность беспроводных персональных сетей (WPAN)

Факторы	Средняя ошибка $\Delta$ RSSI, дБм	Максимальная ошибка $\Delta$ RSSI <sub>max</sub> , дБм	Максимальное расстояние между передатчиками $D_{max}$ , м
Свободная среда без других сетей 2,4 ГГц	<b>12,37</b>	<b>18,82</b>	<b>34,22</b>
Асинхронный двигатель	12,69	19,37	33,99
Отражающая среда (склад металлопродукта)	16,33	23,39	22,54
Шаговый двигатель	17,51	29,41	19,67
Аппарат TIG-сварки	21,10	34,35	13,01
Зашумленная среда другими сетями 2,4 ГГц	25,03	32,37	8,27
Экранирование толстостенной стальной трубой	<b>26,67</b>	<b>34,41</b>	<b>6,85</b>

В таблице жирным шрифтом выделены наилучшие и наихудшие значения показателей.

средственно между узлами, установленными на самом оборудовании.

### Заключение

Выполнена серия экспериментов по определению помехозащищенности беспроводных персональных сетей в производственной среде. Предложен способ оценки помехозащищенности таких сетей на основе показателя уровня принимаемого сигнала.

Показана принципиальная возможность развертывания беспроводных персональных сетей в условиях реального производства при наличии силового оборудования. Выявлены факторы ослабления беспроводного сигнала, и вычислены значения помехозащищенности на реальном производстве.

Учитывая полученные данные, можно сделать вывод о том, что многие производственные факторы оказывают ощутимое влияние на качество сигнала беспроводных персональных сетей, воздействие которых не настолько значительное, чтобы отказываться от их применения. Более того, влияние многих факторов может

быть нивелировано применением ячеистой топологии и плотным расположением приемников и передатчиков в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4. Стоит отметить важность проведения соответствующих измерений для каждого конкретного производства, поскольку это обеспечит эффективное расположение приемников и передатчиков в цеховых помещениях.

Также полученные результаты могут быть полезными в процессе цифровой трансформации производства в соответствии с концепцией Индустрия 4.0, подразумевающей большую гибкость и мобильность производственного процесса. Очевидно, что при реализации данной концепции, беспроводной метод передачи данных с полевых датчиков становится предпочтительнее проводного. Разработанная методика оценки помехозащищенности беспроводных сетей может быть применена на практике при создании схем размещения оборудования в производственных цехах с учетом данных требований. При этом проведение анализа помехозащищенности беспроводной сети повышает ее надежность и отказоустойчивость в условиях цифрового производства.

### Литература

- Aheleroff S., Philip R., Zhong R.Y., Xu X. The degree of mass personalisation under Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2019. V. 81. P. 1394–1399. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.050
- Mehta B.R., Reddy Y.J. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*. Chapter 14. Wireless communication. Butterworth-Heinemann, 2015. P. 417–457.
- Stenumgaard P., Chilo J., Ferrer-Coll J., Angskog P. Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments // *IEEE Communications Magazine*. 2013. V. 51. N 6. P. 187–192. doi: 10.1109/MCOM.2013.6525614
- Ångskog P., Karlsson C., Coll J.F., Chilo J., Stenumgaard P. Sources of disturbances on wireless communication in industrial and factory environments // *Proc. of the Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC 2010)*. Beijing, China, 2010. P. 281–284. doi: 10.1109/APEMC.2010.5475862
- Li H., Liu L., Li Y., Yuan Z., Zhang K. Measurement and characterization of electromagnetic noise in edge computing networks for the industrial Internet of Things // *Sensors (Switzerland)*. 2019. V. 19. N 14. P. 3104. doi: 10.3390/s19143104
- Saaifan K.A., Henkel W. Measurements and modeling of impulse noise at the 2.4 GHz wireless LAN band // *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE Global Conference*

### References

- Aheleroff S., Philip R., Zhong R.Y., Xu X. The degree of mass personalisation under Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 81, pp. 1394–1399. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.050
- Mehta B.R., Reddy Y.J. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*. Chapter 14. Wireless communication. Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 417–457.
- Stenumgaard P., Chilo J., Ferrer-Coll J., Angskog P. Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments. *IEEE Communications Magazine*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 187–192. doi: 10.1109/MCOM.2013.6525614
- Ångskog P., Karlsson C., Coll J.F., Chilo J., Stenumgaard P. Sources of disturbances on wireless communication in industrial and factory environments. *Proc. of the Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC 2010)*, Beijing, China, 2010, pp. 281–284. doi: 10.1109/APEMC.2010.5475862
- Li H., Liu L., Li Y., Yuan Z., Zhang K. Measurement and characterization of electromagnetic noise in edge computing networks for the industrial Internet of Things. *Sensors (Switzerland)*, 2019, vol. 19, no. 14, pp. 3104. doi: 10.3390/s19143104
- Saaifan K.A., Henkel W. Measurements and modeling of impulse noise at the 2.4 GHz wireless LAN band. *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE Global Conference*

- on Signal and Information Processing (GlobalSIP 2017). Montreal, Canada, 2017. P. 86–90. doi: 10.1109/GlobalSIP.2017.8308609
7. Takaya K., Maeda Y., Kuwabara N. Experimental and theoretical evaluation of interference characteristics between 2.4-GHz ISM-band wireless LANs // Proc. of the 1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record, Denver, CO, USA, 1998. V. 1. P. 80–85. doi: 10.1109/IEMC.1998.750064
  8. Guo W., Healy W.M., Zhou M. Impacts of 2.4-GHz ISM band interference on IEEE 802.15.4 wireless sensor network reliability in buildings // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. V. 61. N 9. P. 2533–2544. doi: 10.1109/TIM.2012.2188349
  9. Zheng G., Han D., Zheng R., Schmitz C., Yuan X. A link quality inference model for IEEE 802.15.4 Low-Rate WPANs // Proc. 54<sup>th</sup> IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011). Houston, TX, USA, 2011. P. 6133782. doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6133782
  10. Konings D., Faulkner N., Alam F., Noble F., Lai E.M. The effects of interference on the RSSI values of a ZigBee based indoor localization system // Proc. 24<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP 2017). Auckland, New Zealand, 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/M2VIP.2017.8211460
  11. Cheffena M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2016. V. 58. N 1. P. 66–73. doi: 10.1109/MAP.2015.2501227
  12. Musáloiu-E.R., Terzis A. Minimising the effect of WiFi interference in 802.15.4 wireless sensor networks // International Journal of Sensor Networks. 2008. V. 3. N 1. P. 43–54. doi: 10.1504/IJSNET.2008.016461

#### Авторы

**Афанасьев Максим Яковлевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194081345, ORCID ID: 0000-0003-4061-1407, amax@niuitmo.ru

**Федосов Юрий Валерьевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1869-0081, yf01@yandex.ru

**Крылова Анастасия Андреевна** — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; программист, ООО «ЛАР Технологии», Санкт-Петербург, 197342, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5822-6702, ananasn94@gmail.com

**Шорохов Сергей Александрович** — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5412-7723, stratumxspb@gmail.com

**Зименко Ксения Владимировна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3792-136X, zksenia@yahoo.com

#### Authors

**Maxim Ya. Afanasiev** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194081345, ORCID ID: 0000-0003-4061-1407, amax@niuitmo.ru

**Yuri V. Fedosov** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, Russian Institute for Power Radioengineering (JSC RIPR), Saint Petersburg, 199048, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1869-0081, yf01@yandex.ru

**Anastasiia A. Krylova** — Postgraduate, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Software Developer, LLC Lar Technologies, Saint Petersburg, 197342, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5822-6702, ananasn94@gmail.com

**Sergei A. Shorokhov** — Postgraduate, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5412-7723, stratumxspb@gmail.com

**Ksenia V. Zimenko** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3792-136X, zksenia@yahoo.com