

Gridin Vladimir Nikolaevich – Design information technologies Center Russian Academy of Sciences; e-mail: info2@ditc.ras.ru; Odintsovo, Marshala Biryuzova, 7a; phone: +74955960219; scientific director; dr. of eng. sc.; professor.

Anisimov Vladimir Ivanovich – e-mail: vianisimov@inbox.ru; phone: +79117448228; chief scientific officer; dr. of eng. sc.; professor.

Abukhazim Monzer Mohammed – St. Petersburg State Electrotechnical University; e-mail Abukhazim_monther@Yahoo.com; St. Petersburg, st. S. Korzun, 20 sq. M. 5; phone: +78122343675; post-graduate student.

УДК 004.94

DOI 10.23683/2311-3103-2018-4-38-47

В.И. Анисимов, С.А. Васильев, В.Н. Гридин**ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОЛНОДУПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОБМЕНА ДАННЫМИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ САПР***

Указываются принципы построения IT-инфраструктуры систем автоматизированного проектирования (САПР). Описываются преимущества использования сервис-ориентированной архитектуры (SOA) для создания информационно-программных САПР. Обозначается возможная платформа Windows Communication Foundation (WCF) для реализации IT-инфраструктуры САПР на основе SOA и полнодуплексного протокола обмена данными WebSocket. Приводятся исторические аспекты становления технологий WCF, SOA, WebSocket. Определяются преимущества использования платформы WCF для создания распределенной САПР в сравнении со стандартной концепцией построения службы. Показаны методы создания коммуникационных модулей клиентской и серверной составляющих для сервисов, использующих платформу WCF. В статье предоставляется код поведения контракта серверной составляющей коммуникационного модуля. Указываются различные параметры настроек класса привязок для использования асинхронных методов обмена информацией и обеспечения связующих служебных функций. В статье приводятся методы работы с WSDL документом и рекомендации транспортной функции протоколов ws:// и http://. Описываются возможные специфичные параметры транспорта для обмена сообщениями. Приводится краткий обзор особенностей для коммуникации в гетерогенных средах. Обозначаются критические случаи взаимодействия кроссплатформенного программного обеспечения. Демонстрируются результаты использования коммуникационных модулей распределенной САПР на примере консольных отчетов. Суммируются преимущества использования всех трех вышеописанных технологий в едином программном обеспечении возможно для использования при построении САПР. Оказывается внимание стандартизированным методам взаимодействия с описанными коммуникационными модулями.

САПР; информационная система; распределенные системы; асинхронный обмен; коммуникационные модули; SOA; WebSocket; WCF.

V.I. Anisimov, S.A. Vasilev, V.N. Gridin**HIGH-SPEED FULL-DUPLEX METHOD OF DATA EXCHANGE FOR DISTRIBUTED CAD**

The principles of IT infrastructure creation of automated design engineering systems (CAD) are specified. Advantages of using the service oriented architecture (SOA) for creation of an information and program CAD are described. The possible Windows platform of Communication Foundation (WCF) for implementation of CAD IT infrastructure on the basis of SOA and the full-duplex exchange protocol is designated by data of WebSocket. Historical aspects of formation of WCF, SOA and WebSocket technologies are given. Advantages of using the WCF platform for creation of the

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00082а.

distributed CAD in comparison to the standard concept of the service creation are considered. Methods of creating the communication modules of client and server components for the services using the WCF platform are shown. The code of contract's behavior of a server component of the communication module is provided herein. Specified are different setting's parameters of bindings class for using asynchronous methods of information exchange and binding official functions support. Operation methods with the WSDL document and the transport function recommendations of the ws://and http:// protocols are given in the article. Possible specific parameters of transport for message exchange are described. The short review of features for communication is provided in the heterogeneous environments. Critical interaction cases of the cross-platform software are designated. Results of using the communication modules of the distributed CAD on the example of console reports are shown. Advantages of using the all three above described technologies in the uniform software possible for use in case of creation CAD are added. Attention is paid to the standardized interaction methods with the described communication modules.

CAD; information system; distributed systems; asynchronous exchange; communication modules; SOA; WebSocket; WCF.

Введение. При создании IT-инфраструктуры САПР трудно предугадать сценарии её развития в процессе эксплуатации. Информационная система и её частный случай САПР являются частью постоянно изменяющейся окружающей среды, с изменением трансформируются потребности среды, в том числе относящейся к системе, соответственно последняя должна эволюционировать в ответ на изменения. К таким изменениям (инновациям) можно отнести: повышение способности взаимодействия внутри системы и с внешней средой, изменение бизнес-логики и процессов. В этой статье будут затронуты проблемы инновации коммуникационных возможностей сервиса, а именно производительность и асинхронность обмена сообщениями [1, 2].

Удачным подходом в области дизайна архитектуры IT-инфраструктуры является, появившаяся в начале 2000-х годов, SOA, представляющая собой обобщение лучших практик создания глобальных информационно-программных систем. SOA имеет большое количество преимуществ, таких как масштабируемость за счет использования распределенных сервисов, гибкость, возможность к модернизации (изменение и добавление) за счет того, что сервисы слабо связаны и имеют стандартизированные интерфейсы и протоколы обмена информацией, абстрагированные от языков программирования, сред разработки и самих разработчиков [3–5].

Для интерактивной работы сервисов, в частности веб-сервисов, требуются асинхронные методы обмена данными, к таким методам относится самая значимая надстройка над TCP - асинхронный полнодуплексный протокол обмена данными WebSocket.

Высокие скорости обмена данными за счет отсутствия большого количества служебной информации при передаче сообщения и возможности асинхронного обмена делают протокол WebSocket наиболее привлекательным для построения коммуникаций сервисов в сравнении с устаревающим протоколом HTTP. Вслед за внутренним обменом информации поспевает и внешний, на текущий момент все популярные браузеры (Chrome, Yandex, Opera, Internet Explorer, Edge, Safari, браузеры для мобильных платформ и т.д.) имеют полноценную поддержку протокола WebSocket [6, 7].

Популярная в последние годы SOA для построения информационных систем, а в частности систем автоматизированного проектирования, имеет полнофункциональную платформу разработки WCF, интегрированную в среду Visual Studio последних поколений. Еще с декабря 2006 года WCF существует в составе .NET Framework 3.0, а с 2012 года платформа стала поддерживать протокол обмена данными WebSocket. Таким образом стоит задача кооперировать сервис-ориентированную архитектуру, построенную на базе WCF сервиса, с протоколом связи WebSocket для обеспечения максимальной производительности системы [8–10].

Коммуникационные модули. Асинхронный вызов сервиса позволяет веб-приложению осуществлять свою деятельность и прочие операции в то время, когда происходит удалённый вызов метода. Клиент-серверные приложения, построенные на платформе WCF, могут участвовать в асинхронных вызовах, обеспечивающих компонентам WCF наибольшую гибкость для увеличения пропускной способности без ущерба для интерактивности сервиса [11, 12].

Для построения коммуникационного модуля сервиса, входящего в состав информационно-программной системы на основе архитектуры SOA с применением протокола WebSocket, следует использовать стандартную парадигму WCF для определения набора интерфейсов. Служба WebSockets состоит из двух интерфейсов: один содержит метод, который принимает запросы клиента, а другой используется для отправки результатов клиенту. Сервис WCF должен реализовать первый интерфейс - тот, в котором метод принимает запросы [13].

Поддержка WebSocket в WCF достигается благодаря новому NetHttpBinding, являющемуся улучшенной привязкой клиента, который использует двоично-кодированные SOAP-сообщения через http (https) или протокол WebSocket, также можно использовать и текстовые сообщения [14, 15].

Код элемента сервиса, реализующего приведенный выше контракт, на примере дополнения сообщения, переданного службе, оснащен счетчиком сообщений для наглядности работоспособности коммуникационного узла. В указанном примере сервис принимает сообщение и отправляет его обратно с добавлением кодового слова «hello» и выводит служебную информацию в консоль, его реализация указана ниже:

```
[ServiceBehavior(ConcurrencyMode = ConcurrencyMode.Reentrant)]
public class WebSocketSampleService : IDuplexContract
{
    int counter = 1;
    public string SayHelloDuplex(string name)
    {
        OperationContext.Current.
GetCallbackChannel<IDuplexCallbackContract>().
        SayingHello("Hello " + name + " by WebSockets");
        return "ответ сервера 1: Hello"+name+"номер обращения:
"+counter;
    }
}
```

Листинг 1. Серверный коммуникационный модуль (сервис)

Конфигурация привязки показывает возможность организации различных типов подключений, например, <endpoint address = "http://localhost:8081" binding = "netHttpBinding" contract = "Contracts.IDuplexContract"/> или <endpoint address = http://localhost:8082 binding = "netHttpBinding" bindingConfiguration = "TextOverWebSockets" contract = "Contracts.IDuplexContract"/> и базовый адрес по которому можно получить описание сервиса в формате WSDL, например, http://localhost:8085/. Также имеется возможность указания специфичных параметров для транспорта, например, <binding name = "RequestResponseWithWebSockets"> <websocketSettings transportUsage = "Always" /> и <binding name = "TextOverWebSockets" messageEncoding = "Text">.

Описание клиентского коммуникационного модуля, использующего `NetHttpBinding` для обмена данными через `WebSockets` сводится к описанию контракта, привязка будет сформирована автоматически при добавлении службы в проект, пример приведен ниже:

```

Services.IDuplexContract duplexProxy;

// Использовать сгенерированный прокси-класс

duplexProxy = new Services.DuplexContractClient(
    callbackContext,
    "DuplexContract");

// Или используйте DuplexChannelFactory

DuplexChannelFactory<Services.IDuplexContract> dchf =
    new DuplexChannelFactory<Services.IDuplexContract>(
        callbackContext,
        "DuplexContractOverText");

duplexProxy = dchf.CreateChannel();
Console.WriteLine("Вызов двустороннего контракта с
исп. текстовых сообщений: ");
Console.WriteLine(duplexProxy.SayHelloDuplex
("WebSocket client №1"));
Console.ReadLine();

```

Листинг 2. Клиентский коммуникационный модуль

При указании адреса конечной точки в службе необходимо использовать схему `http://`, а на клиентской стороне можно использовать либо `http://`, либо `ws://`. При создании ссылки на службу клиентское приложение будет использоваться схема `ws://`. Если конечная точка службы использует `NetHttpBinding`, можно использовать контракт без дуплекса (без контракта обратного вызова), но канал будет HTTP, а не `WebSocket`. На основании указанных методов коммуникации клиент-серверных приложений можно рекомендовать технологию WCF к применению. Также стоит выделить ряд особенностей использования WCF [16–18]:

- ◆ Технология поддерживает надежную защиту, обмен сообщениями, транзакции и функциональную совместимость.
- ◆ Поддержка сериализации `DataContract` путем использования `System.Runtime.Serialization`.
- ◆ Обработка исключений улучшена путем использования `FaultContract`, исключения не возвращаются к клиенту в качестве ошибки SOAP.
- ◆ WCF поддерживает многопоточную обработку с помощью `ServiceBehavior` класса.

Для оценки эффективности (характера взаимодействия) в области интерактивности описанных технологий по отношению к конечному пользователю целесообразно провести сравнение количества передаваемых пакетов для поддержания актуальной информации на веб сайте. В качестве инструментов для проведения исследования были определены браузер `Google Chrome 9` и программа `Wireshark Network Protocol Analyzer` для получения информации о количестве переданных

пакетов в зависимости от времени при условии использования различных асинхронных технологий обмена данными. Ниже на рис. 1 представлен график, отражающий зависимость объема переданных данных от времени [19]:

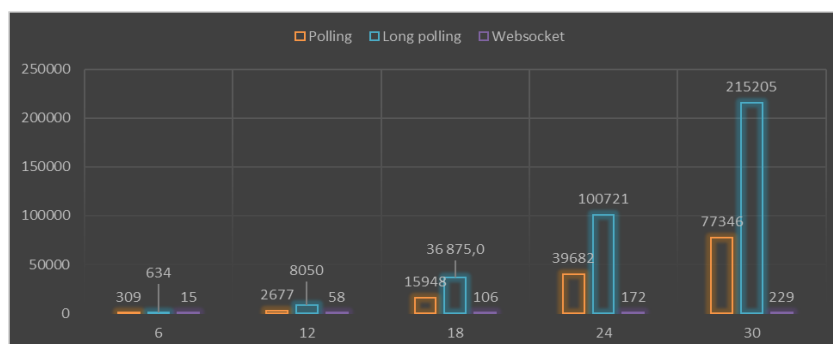


Рис. 1. Зависимость объема переданных различных подходов данных от времени

Исходя из полученной информации наилучший характер и наивысшую степень взаимодействия клиент-серверных приложений, а значит и предоставляемую конечному пользователю интерактивность, демонстрирует полнодуплексный протокол WebSocket [22].

Продолжительность жизни канала связи, используемого подходами на основе HTTP, вынуждена быть краткосрочной либо в силу формата самого запроса, либо работы прокси-сервера. Соответственно соединение может находиться в открытом состоянии сколь угодно долго и быть неактивным, а значит, не требовать ресурсов для обработки. В нужный момент времени по заранее созданному соединению можно легко передавать любые данные. В таком случае возможно перенасыщение сервера числом открытых сокетов TCP (Transmission Control Protocol), однако использование на сервере мультиплексорного программного обеспечения существенно увеличивает число стабильно работающих соединений. На рис. 2 представлена схема асинхронного подхода к передаче данных на основе протокола WebSocket.

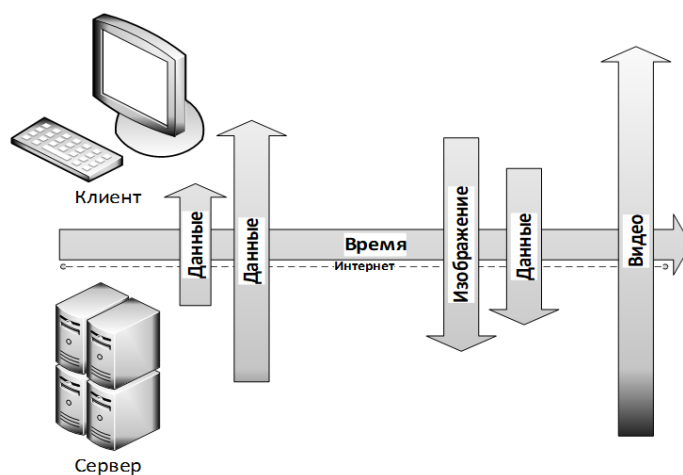


Рис. 2. Схема асинхронного подхода к передаче данных на основе протокола WebSocket

При этом использование протокола двухсторонней полнодуплексной связи WebSocket существенно сокращает объем передаваемой служебной информации в сравнении с любым другим, использующим в своей основе HTTP-протокол.

Обмен сообщениями. Для проверки подключения описанной схемы были проведены испытания на простейшем примере, передающем сообщения в клиент-серверной среде WCF на основе протокола WebSocket. Служебная информация, касающаяся коммуникаций, фиксирующая все основные этапы обработки сигнала, как веб-службы, так и клиентского терминального приложения, выводилась в консоль как показано на рис. 3 ниже.

The image shows two overlapping Windows command prompt windows. The top window, titled 'WCF WebSocket/Service/Host/bin/Debug/Host.EXE', displays the following text: 'Service is opened, press Enter to stop', 'Address: http://localhost:8081/', 'Contact: IDuplexContract', 'Binding: NetHttpBinding', 'WebSockets mode: WhenDuplex', 'WebSockets subProtocol: soap'. The bottom window, titled 'WCF WebSocket/Client/Client/bin/Debug/Client.EXE', displays: 'Press enter when service is ready', 'Вызов двустороннего контракта с использованием текстовых сообщений:', 'Hello WebSocket client №1 by WebSockets ответ 1', and 'ответ сервера 1: Hello WebSocket client №1 номер обращения: 1'.

Рис. 3. Пример клиент-серверного взаимодействия

Для применения коммуникационного модуля с внешними узлами веб-клиентами стоит иметь ввиду, что, используя netHttpBinding, все данные, переданные в соединении WCF WebSocket, находятся в формате SOAP (двоичный или текстовый). Чтобы связаться с сервисом WCF WebSocket с кодом JavaScript на веб-странице, требуется самостоятельно разобрать SOAP. Следует отметить, что передача сложноструктурированных данных, таких как многомерные массивы, возможна посредством протокола SOAP, но имеет некоторые ограничения при работе в кроссплатформенных системах, связанные с различной интерпретацией системами таких данных. Единообразные подходы к организации работы с данными, выдержанными в среде .NET (наборы данных DataSet), не поддерживаются в наборе спецификаций J2EE. Для обеспечения корректного взаимодействия клиент-серверных приложений в разработанных гетерогенных средах следует отказаться от использования многомерных массивов и определить собственные механизмы работы веб-сервиса с внешней средой [23].

Выводы. Создание информационно-программных систем возможно на основе SOA с применением протокола связи WebSocket и программного фреймворка WCF с приведенными ниже особенностями:

1. Использование указанных технологий позволяет получить преимущества этих методик, такие как масштабируемость и гибкость за счёт изменения, добавления слабосвязанных компонентов системы на основании концепции SOA, увеличение производительности за счет повышения скорости обмена данными и интерактивность, за счёт асинхронного обмена данными с внешней средой, достигаемые посредством применения протокола WebSocket.

2. В соответствии с определением веб-службы методика обеспечивает кроссплатформенное взаимодействие, основанное на базе открытых стандартов и протоколов (SOAP и WSDL), а также полную инфраструктурную поддержку со стороны разработчиков всех современных популярных браузеров для создания клиентских веб-приложений.

3. Для создания информационно-программных систем на основе SOA подойдет программный фреймворк WCF, обладающий встроенными средствами работы с протоколом WebSocket. Описанные модификации программной модели WCF не нарушают стандартизацию интерфейсов и методов взаимодействия в клиент серверных системах.

4. Показано, что целесообразно использовать полнодуплексный асинхронный вызов сервиса, что позволяет веб-приложению осуществлять свою деятельность и выполнять прочие операции, в то время, когда происходит удалённый вызов метода. Клиент-серверные приложения, построенные на платформе WCF, могут участвовать в асинхронных вызовах, обеспечивающих компонентам WCF наибольшую гибкость для увеличения пропускной способности без ущерба для интерактивности сервиса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лаврищева Е.М., Карпов Л.Е., Томилин А.Н.* Сервисные средства Интернет для решения бизнес-задач // Труды ИСП РАН. – 2015. – № 1. – С. 125-150.
2. *Воронцов Ю.А., Козинец А.В.* Стандарты веб-сервисов для создания распределенных информационных систем // Век качества. – 2015. – № 3. – С. 55-72.
3. *Лаушкин А.Ф., Ткачев Д.В., Саятин А.В.* Разработка распределенной системы составления расписания на основе концепции service oriented architecture (SOA) (на примере Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева) // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – № 7. – С. 394-395.
4. *Гридин В.Н., Анисимов В.И., Васильев С.А.* Методы взаимодействия компонентов распределенных схемотехнических САПР на основе протокола WebSocket // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2017. – № 2. – С. 62-67.
5. *Дятлов А.К., Мурыгин А.В.* Интеграция системы управления содержимым с WCF-сервисами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – № 11. – С. 447-449.
6. *Орлов А.А., Тельных А.А., Степанов Е.А., Сорокин А.Д., Аксенова Ю.Е.* Технические аспекты создания автоматизированных информационных систем многоцелевого применения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. – № 4. – С. 40-44.
7. *Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А.* Архитектура распределенных сервис-ориентированных систем автоматизированного проектирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 51-58.
8. *Шнепс-Шнеппе М.А., Сухомлин В.А., Намиот Д.Е.* О глобальных информационных системах // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – № 4. – С. 55-62.
9. *Корниловский А.В., Губин В.А.* Разработка веб-сервиса удалённого взаимодействия с базами данных // АСУ и приборы автоматики. – 2010. – № 151. – С. 86-88.
10. *Дутиков Д.Н.* Применение soap-сервисов для обеспечения взаимодействия внутри распределенной информационной системы и удаленного управления ресурсами // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – № 22 (198). – С. 9-14.
11. *Федоренков Р.В., Ничушкина Т.Н.* Интерактивный веб-сервис WebSocket 2307-0595 // Инженерный вестник. – 2015. – № 01. – С. 539-545.
12. *Колосков М.А.* Методы обмена данными между клиентом и сервером в веб-приложениях с применением коммуникаций реального времени // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сб. ст. по мат. XLIII международная студенческая научно-практическая конференция. – № 6 (42). – URL: [https://sibac.info/archive/technic/6\(42\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/6(42).pdf) (дата обращения: 06.02.2017).

13. *Акользин Д.Н.* Обзор методов повышения производительности программного обеспечения диспетчерского центра // ИВД. – 2014. – № 2. – С. 81.
14. *Шестаков В.С., Сагидуллин А.С.* Применение технологий WebSocket в WEB-приложениях технологического назначения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Вып. № 4 / том 58. – С. 328-330.
15. *Беседа Д.Г., Семенистый Н.В., Аноприенко А.Я.* Исследование технологии построения приложений реального времени с использованием протокола websocket // Конференция ИУС КМ - 2013: [155]. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2013. – С. 276-282.
16. *Цветков И.Я., Алтатов А.Н.* Проблемы распределенных систем // ПНиО. – 2014. – № 6 (12). – С. 31-36
17. *Кононов Д.Д.* Сервис-ориентированная архитектура защищенных веб-приложений муниципального управления // Решетневские чтения. – 2016.
18. *Касьянова Е.Л., Кикин П.М., Грищенко Д.В.* Разработка картографических приложений для мобильных устройств // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – № 1. – С. 75-78.
19. *Пелёвина А.А., Гнетова А.И., Скопич Д.В.* Web-технологии в управлении производством // Ceteris Paribus. – 2016. – № 1-2. – С. 11-14.
20. *Дмитревич Г.Д., Мохсен Аяд А.А., Ларистов А.И.* Архитектура Web-ориентированных САПР // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 5. – С. 20-2320. С.2.
21. *Данилов И.Г.* Сервис-ориентированная архитектура как основа для построения современных распределённых систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 168-173
22. *Веселовская В.В.* Сервис-ориентированная архитектура в банковской сфере // Научные записки молодых исследователей. – 2014. – № 2. – С. 63-69.
23. *Капочников А.А., Якубайлик О.Э.* Сервис-ориентированные веб-системы для обработки геопространственных данных // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2015. – № 1. – С. 37-45.

REFERENCES

1. *Lavrishheva E.M., Karpov L.E., Tomilin A.N.* Servisnye sredstva Internet dlja reshenija biznes-zadach [Internet service tools for solving business problems], *Trudy ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2015, No. 1, pp.125-150.
2. *Voroncov Yu.A., Kozinec A.V.* Standarty veb-servisov dlya sozdaniya raspredelennykh informatsionnykh sistem [Standards of web services to create distributed information systems], *Vek kachestva* [the Age quality], 2015, No. 3, pp. 55-72.
3. *Laushkin A.F., Tkachev D.V., Sayapin A.V.* Razrabotka raspredelennoj sistemy sostavlenija raspisaniya na osnove koncepcii service oriented architecture (SOA) (na primere Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva) [Development of a distributed system of scheduling based on the concept of service oriented architecture (SOA) (the example of the Siberian state aerospace University named after academician M.F. Reshetnev)], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics], 2011, No. 7, pp. 394-395.
4. *Gridin V.N., Anisimov V.I., Vasil'ev S.A.* Metody vzaimodeystviya komponentov raspredelennykh shemotekhnicheskikh SAPR na osnove protokola WebSocket [Methods of interaction of components of the distributed circuit design CAD on the basis of the WebSocket Protocol], *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems], 2017, No. 2, pp. 62-67.
5. *Dyatlov A.K., Murygin A.V.* Integraciya sistemy upravleniya sodержimym s WCF-servisami [Content management system Integration with WCF-services], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics], 2015, No. 11, pp. 447-449.
6. *Orlov A.A., Tel'nykh A.A., Stepanov E.A., Sorokin A.D., Aksenova Yu.E.* Tehnicheskie aspekty sozdaniya avtomatizirovannykh informacionnykh sistem mnogocelevogo primeneniya [Technical aspects of creation of automated information systems multi-purpose applications], *Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High technologies in space research of the Earth], 2013, No. 4, pp. 40-44.

7. Gridin V.N., Dmitrevich G.D., Anisimov D.A. Arhitektura raspredelennykh servis-orientirovannykh sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya [Architecture of distributed service-oriented systems of computer-aided design], *Izvestiya JuFU. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 51-58.
8. Shneps-Shneppe M.A., Suhkomin V.A., Namiot D.E. O global'nykh informatsionnykh sistemakh [On global information systems], *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, No. 4, pp. 55-62.
9. Kornilovskiy A.V., Gubin V.A. Razrabotka veb-servisa udalennogo vzaimodeystviya s bazami dannykh [Development of a web service remotng with databases], *ASU i pribory avtomatiki*. [ACS and automation devices], 2010, No. 151, pp. 86-88.
10. Dutikov D.N. Primenenie soap-servisov dlya obespecheniya vzaimodeystviya vnutri raspredelennoy informacionnoy sistemy i udalennogo upravleniya resursami [Use of soap services to enable interoperability within a distributed information system and remote resource management], *Vestnik JuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika* (Herald SUSU. Series: Computer technology, control, radio electronics), 2010, No. 22 (198), pp. 9-14.
11. Fedorenkov R.V., Nichushkina T.N. Interaktivnyy veb-servis WebSocket [Interactive, web-services WebSocket], *Inzhenernyy vestnik* [Engineering journal], 2015, No. 01, pp. 539-545.
12. Koloskov M.A. Metody obmena dannymi mezhdru klientom i serverom v veb-prilozheniyakh s primeneniem kommunikatsiy real'nogo vremeni [Methods of data exchange between the client and the server in web applications using real-time communications], *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: sb. st. po mat. XLIII mezhdunarodnaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [Scientific community of students of XXI century. Engineering science: collection of articles on the Mat. XLIII international student scientific and practical conference], No. 6 (42). Available at: [https://sibac.info/archive/technic/6\(42\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/6(42).pdf) (Accessed 06 February 2017).
13. Akol'zin D.N. Obzor metodov povysheniya proizvoditel'nosti programmogo obespecheniya dispetcherskogo centra (Overview of methods to improve the performance of the software control center), *IVD (IVD)*, 2014, No. 2, pp. 81.
14. Shestakov V.S., Sagidullin A.S. Primenenie tehnologiy WebSocket v WEB-prilozheniyakh tehnologicheskogo naznacheniya [Technology Use Websockets in WEB applications technological applications], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Proceedings of higher educational institutions. Instrument making], 2015, No. 4 / Vol. 58, pp. 328-330.
15. Beseda D.G., Semenisty N.V., Anoprienko A.Ya. Issledovanie tehnologii postroeniya prilozheniy real'nogo vremeni s ispol'zovaniem protokola websocket [the Study of the technology of building real-time applications using websocket Protocol], *Konferentsiya IUS KM - 2013: [155]*. [Conference ICS KM - 2013: [155]]. *Donetsk: Donetskiy natsional'nyy tehnichestkiy universitet*, 2013, pp. 276-282.
16. Tsvetkov I.Ya., Alpatov A.N. Problemy raspredelennykh sistem [Problems of distributed systems], *PNiO [Pnio]*, 2014, No. 6 (12), pp. 31-36.
17. Kononov D.D. Servis-orientirovannaya arkhitektura zashchishchennykh veb-prilozheniy munitsipal'nogo upravleniya [Service-oriented architecture secure web applications municipal administration], *Reshetnevskie chteniya* [Resetdevice reading], 2016.
18. Kas'yanova E.L., Kikin P.M., Grishchenko D.V. Razrabotka kartograficheskikh prilozheniy dlya mobil'nykh ustroystv [Development of map applications for mobile devices], *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo geo-Siberia], 2015, No. 1, pp. 75-78.
19. Peleovina A.A., Gnetova A.I., Skopich D.V. Web - tehnologii v upravlenii proizvodstvom [Web technologies in management of production], *Ceteris Paribu*, 2016, No. 1-2, pp. 11-14.
20. Dmitrevich G.D., Mohsen Ajad A.A., Laristov A.I. Arhitektura Web-orientirovannykh SAPR [Architecture of Web-based CAD systems], *Informacionno-upravlyajushchie sistemy* [Information and control systems], 2010, No. 5, pp. 20-2320, pp. 2.
21. Danilov I.G. Servis-orientirovannaya arkhitektura kak osnova dlya postroeniya sovremennykh raspredelennykh sistem [Service-oriented architecture as a basis for building modern distributed systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7, pp. 168-173.

22. Veselovskaya V.V. Servis-orientirovannaya arkhitektura v bankovskoy sfere [Service-oriented architecture in the banking industry], *Nauchnye zapiski molodykh issledovateley* [Scientific notes of young researchers], 2014, No. 2, pp. 63-69.
23. Kadochnikov A.A., Yakubaylik O. Je. Servis-orientirovannye veb-sistemy dlya obrabotki geoprostranstvennykh dannykh [Service-oriented web system for spatial data processing], *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Vestnik NSU. Series: Information technologies], 2015, No. 1, pp. 37-45.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Бахтадзе.

Анисимов Владимир Иванович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: vianisimov@inbox.ru; 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, корп. I, помещение 11-53; тел.: +78122343675; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Васильев Сергей Алексеевич – e-mail: venom-gt@list.ru; кафедра САПР; аспирант.

Гридин Владимир Николаевич – Центр информационных технологий в проектировании РАН; e-mail: info2@ditc.ras.ru; г. Одинцово, ул. Маршала Бирюзова, 7а; тел.: 84955960219; научный руководитель; д.т.н.; профессор.

Anisimov Vladimir Ivanovich – Saint-Petersburg State Electrotechnical University; e-mail: vianisimov@inbox.ru; Professora Popova street, 5-1 room 53, 197376 St. Petersburg, Russia, 197376; phone: +78122343675; the department of CAD; dr. of eng. sc.; professor.

Vasylev Sergey Alexeyevich – e-mail: venom-gt@list.ru; the department of CAD; postgraduate student.

Gridin Vladimir Nikolaevich – Design information technologies Center Russian Academy of Sciences; e-mail: info2@ditc.ras.ru; Odintsovo, Marshala Biryuzova, 7a; phone: +74955960219; scientific director; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 519.17

DOI 10.23683/2311-3103-2018-4-47-58

**Л.А. Зинченко, В.А. Верстов, Б.С. Сорокин, И.В. Никитин, А.С. Бачурин,
М.В. Гусев, В.Е. Дмитриев**

АЛГОРИТМ ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МИКРОСИСТЕМАХ С ПРЕДФРАКТАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ*

Рассмотрены особенности проектирования распределенных микросистем, которые могут быть использованы при создании Интернета вещей. Отмечено, что при решении практически важных задач задание веса ребра графа зависит от конкретного приложения. Показано, что в иерархических распределенных микросистемах вопросы обеспечения работоспособности отдельных узлов, являющихся ретрансляторами информации для отдельных узлов системы, являются крайне важными. Отмечено, что при использовании распределенных микросистем в лабиринтных структурах, например, в условиях городской застройки, при использовании естественных каналов передачи информации также необходимо учитывать многолучевой характер распространения радиоволн. Для повышения вероятности сохранения работоспособности проектируемых устройств при внешних помехах предложено при синтезе топологии распределенных микросистем использовать самоподобные множества, в частности фракталы. Для одного из возможных вариантов реализации предложенного подхода рассмотрено использование предфрактальных графов, являющихся конечными аналогами фрактальных графов. Были проведены вычислительные эксперименты по исследованию временной сложности наиболее эффективных алгоритмов поиска кратчайшего пути. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00676 а.