

МНОГОУРОВНЕВАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

С. М. МАКАРОВ, В. Г. ШЕНДРИК

*„НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“,
141091, Московская область, г. Королев, Россия
E-mail: makarov.sm@niiks.com*

Проанализированы особенности контроля состояния объектов ракетно-космической техники (РКТ), перевозимых железнодорожным транспортом. Рассмотрены вопросы комплексного использования методов, технологий и средств навигационных определений на основе комбинированных навигационных систем, включающих малогабаритные бесплатформенные инерциальные модули с модулями коррекции координат по сигналам ГЛОНАСС/GPS. Разработан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса многоуровневой беспроводной системы оценки состояния транспортируемых объектов космической техники, основанный на комплексировании комбинированных навигационных систем с телеметрическими средствами измерений внешних факторов, воздействующих на эти объекты. Сбор информации о состоянии объекта РКТ собирается дистанционно бесконтактными датчиками с низким энергопотреблением. Датчики объединены в самоорганизующуюся беспроводную сеть посредством радиомодулей, работающих по стандарту IEEE 802.15.4 ZigBee. Такой подход позволяет осуществлять сбор и передачу информации о состоянии контролируемого объекта РКТ на различные уровни контроля и оперативного управления в режиме времени, близком к реальному.

Ключевые слова: объект ракетно-космической техники, самоорганизующиеся сети, транспортирование, контроль параметров внешних воздействующих факторов, беспроводные и бесконтактные датчики

Введение. В условиях развития космической отрасли, увеличения количества и сложности решаемых задач, роста затрат на производство и эксплуатацию космических аппаратов, связанных с применением все более технологичных и сложных систем при создании космической техники, средств выведения, различных компонентов ракетно-космических систем, в целях повышения безопасности при эксплуатации и надежности функционирования, возрастает необходимость поиска новых решений, обеспечивающих сохранность объектов ракетно-космической техники на всех этапах. Один из этапов, во время которого очень высока вероятность повреждения объектов ракетно-космической техники (РКТ), — перевозка на значительные расстояния, например от завода-изготовителя к месту эксплуатации, различными видами транспорта и, в частности, железнодорожным [1, 2].

Анализ задач контроля состояния объектов РКТ при перевозках железнодорожным транспортом. Подвергаясь в процессе транспортирования воздействию различных внешних факторов, изделия РКТ могут получить как внешние, так и скрытые внутренние повреждения, которые, в свою очередь, способны привести к возникновению неисправностей и всевозможных аварийных ситуаций во время эксплуатации.

Наличие достоверной и полной информации о характере и величине воздействующих факторов на транспортируемый объект РКТ, а также о возникновении и развитии во времени аварийных ситуаций позволяет:

— оценивать масштабы как видимых, так и скрытых повреждений;

- определять целесообразность дальнейшего использования объектов РКТ по назначению;
- принимать правильные решения в случае возникновения нештатных ситуаций;
- накапливать и анализировать статистику, вносить необходимые изменения в технические решения и организационные мероприятия.

Поэтому получение в режиме реального времени информации о местоположении объектов РКТ, контроль и оценка параметров, характеризующих их состояние, состояние транспортных средств и контейнеров, контроль и оценка параметров внешних воздействующих факторов являются актуальными задачами.

Системы контроля и оценки состояния перевозимых по железной дороге РКТ должны обеспечивать:

- повышение достоверности данных о состоянии объектов РКТ;
- увеличение скорости доставки информации о местоположении и состоянии объектов РКТ на различные уровни контроля и оперативного управления;
- локализацию нештатных (аварийных) ситуаций в пространстве и времени в режиме реального времени;
- фиксирование данных о возникновении нештатных ситуаций, в том числе для предъявления претензий при нарушении условий и правил транспортирования, а также в качестве доказательств при возникновении страховых случаев;
- увеличение надежности безаварийной доставки объектов РКТ.



Рис. 1

Объекты РКТ (рис. 1) перевозятся железнодорожным транспортом как на открытых платформах, так и в специальных вагонах. Наиболее чувствительные к внешним воздействиям объекты РКТ (космические аппараты, разгонные блоки) в собранном и снаряженном виде транспортируются в защитных пылевлагодонепроницаемых, термостатируемых контейнерах. Задачами системы контроля и оценки состояния РКТ являются мониторинг защитного контейнера и контроль величин воздействующих на него внешних факторов.

Задачи и возможности многоуровневой беспроводной системы оценки состояния транспортируемых объектов космической техники. В результате решения комплекса задач по контролю и оценке состояния транспортируемых объектов РКТ разработан аппаратно-программный комплекс многоуровневой беспроводной системы оценки (АПК МБСО), позволяющий реализовать основные функции контроля и оценки состояния объектов РКТ на всем этапе перевозки железнодорожным транспортом.

В работе АПК МБСО используются комплексные методы, технологии и средства навигационных определений на основе комбинированных навигационных систем, включающих малогабаритные бесплатформенные инерциальные модули с модулями коррекции координат

по сигналам ГЛОНАСС/GPS, совмещенными с телеметрическими средствами контроля состояния объектов и измерения воздействующих на них внешних факторов.

Развитие микропроцессорных технологий, постоянное снижение стоимости беспроводных решений и повышение их эксплуатационных параметров позволяет отказаться от проводных сетей при разработке АПК МБСО и применить беспроводные сенсорные сети, которые отличаются более гибкой архитектурой, требуют меньших затрат на установку и обслуживание и при этом позволяют получать достоверную и полную информацию о состоянии объектов контроля практически в режиме реального времени на протяжении всего этапа транспортирования объектов РКТ. В АПК МБСО для сбора и передачи информации от сенсоров и датчиков величин внешних воздействующих факторов использована технология организации беспроводных каналов связи, основанная на применении радиомодулей, работающих по протоколам, регламентированным стандартом IEEE 802.15.4 ZigBee, и имеющих возможность реализации самоорганизующихся беспроводных сетей.

Функциональные возможности АПК МБСО:

— постоянное определение географических координат объектов РКТ и передача всей текущей информации об их местоположении и состоянии на различные уровни управления и контроля в режиме времени, близком к реальному.

— непрерывный контроль величин и направлений динамических нагрузок, а также параметров окружающей среды, таких как давление, температура, влажность воздуха, задымленность;

— мониторинг очагов пожара в непосредственной близости от объекта РКТ или на самом объекте;

— контроль локальных механических воздействий, вызванных столкновениями с крупными и тяжелыми предметами, например, в результате их падения на объект РКТ или защитный контейнер;

— контроль целостности узлов крепления объектов РКТ или защитных контейнеров;

— выявление фактов несанкционированного доступа посторонних лиц к объектам РКТ, находящимся на железнодорожной платформе или в вагоне;

— предупреждение об условиях движения железнодорожного состава, вызывающих предельно допустимые уровни нагрузок на перевозимые объекты РКТ;

— фиксирование информации о превышении предельно допустимых значений воздействующих факторов и их величинах.

Архитектура и состав АПК МБСО. В предложенном аппаратно-программном комплексе используются беспроводные бесконтактные датчики с низким энергопотреблением, связанные с комбинированным навигационно-телекоммуникационным модулем (КНТМ) посредством беспроводной сенсорной сети стандарта ZigBee.

Можно выделить два уровня подсистем АПК МБСО — нижний и верхний (рис. 2). Нижний уровень АПК МБСО включает:

— систему беспроводных бесконтактных датчиков для измерения параметров воздействующих факторов и контроля состояния объектов РКТ;

— сеть радиомодулей для сбора и передачи информации по каналам ZigBee в КНТМ, где осуществляются ее дальнейшая обработка и передача пользователям;

— КНТМ, состоящий из спутниковой и инерциальной систем навигации, системы сбора и передачи телеметрической информации о состоянии объекта РКТ на все уровни управления и контроля;

— персональный компьютер, используемый для настройки и контроля КНТМ, а также в качестве мобильного диспетчерского пункта нижнего уровня (в вагоне сопровождения);

— аппаратуру передачи данных по GSM и спутниковым каналам радиосвязи;

— аппаратуру электропитания от бортовой сети вагона сопровождения, аппаратуру автономного питания и аппаратуру зарядки аккумуляторных батарей сенсорных блоков и отдельных автономных беспроводных датчиков.

На верхних уровнях АПК МБСО включает:

- серверы для приема информации о состоянии контролируемых объектов РКТ;
- диспетчерские центры для фиксирования и отображения информации в режиме реального времени;
- аппаратуру приема данных по GSM и спутниковым каналам радиосвязи.

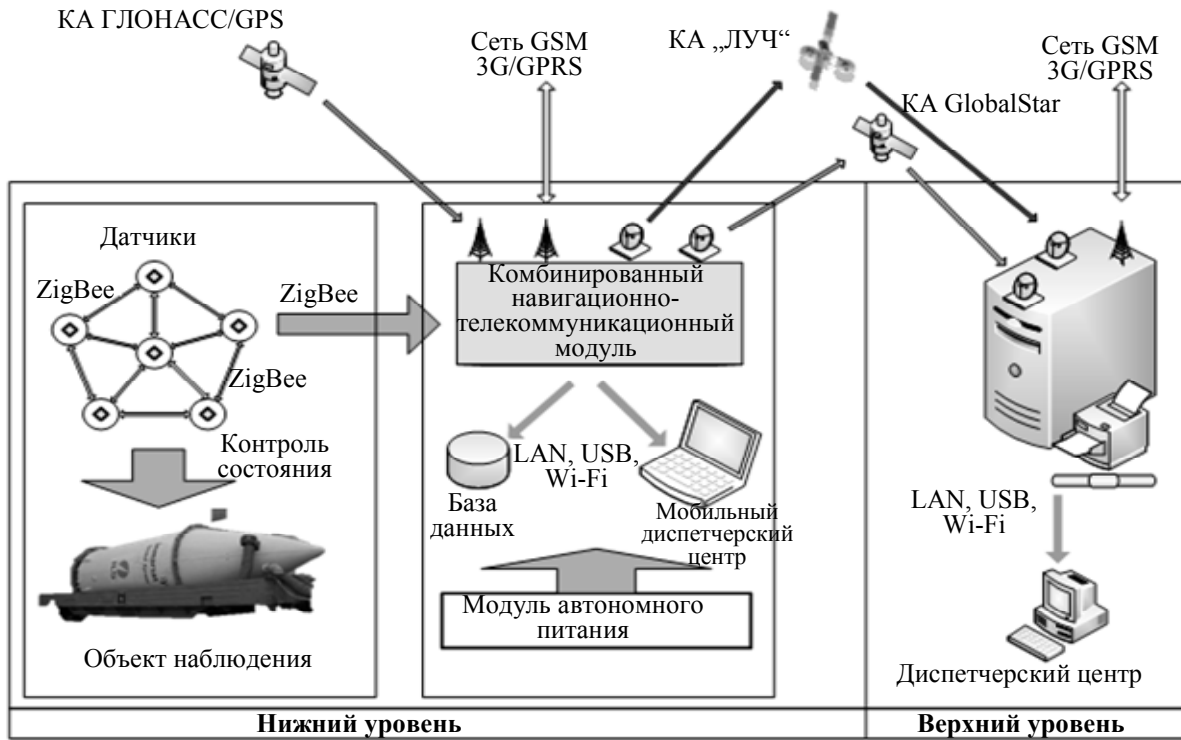


Рис. 2

Для определения величин внешних воздействий в состав базового комплекта АПК МБСО нижнего уровня входят датчики загазованности, давления, температуры, влажности, инфракрасные датчики движения, акселерометры, ультразвуковые датчики определения расстояния, акустические датчики удара. Перечисленные датчики имеют низкое энергопотребление и могут быть запитаны от компактных литий-ионных источников питания, обеспечивающих их автономную работу в течение двух-трех недель.

При этом проводится мониторинг следующих параметров и событий:

- температура, влажность и давление окружающей среды;
- уровень динамических нагрузок в трех ортогональных плоскостях;
- механические воздействия точечного характера (удары);
- задымление и наличие открытого пламени;
- положение контролируемого объекта РКТ относительно платформы (вагона);
- отсутствие посторонних лиц на платформе или в вагоне с транспортируемым объектом РКТ.

Датчики могут устанавливаться как автономно, так и в составе единого сенсорного блока с автономным электропитанием, с подключением к одному радиомодулю ZigBee, если не предъявляются особые требования к их монтажу и размещению относительно контролируемого объекта. К одному радиомодулю ZigBee одновременно можно подключить до десяти дискретных и до четырех аналоговых датчиков [3—9].

Каждый автономно работающий датчик или сенсорный блок образует узел беспровод-

ной сенсорной сети, состоящий из вычислительного модуля, датчика (сенсора) или группы датчиков, модуля беспроводной связи и модуля электропитания. Специальное программное обеспечение позволяет узлам беспроводной сенсорной сети организовываться в распределительные сети, связываться друг с другом, обмениваться данными с ближайшими узлами, расстояние до которых обычно не превышает 10—20 м. В зависимости от спектра решаемых системой задач количество датчиков в группе и число самих групп могут увеличиваться или уменьшаться.

Группы датчиков (рис. 3) также связываются между собой посредством беспроводной сенсорной сети ZigBee.

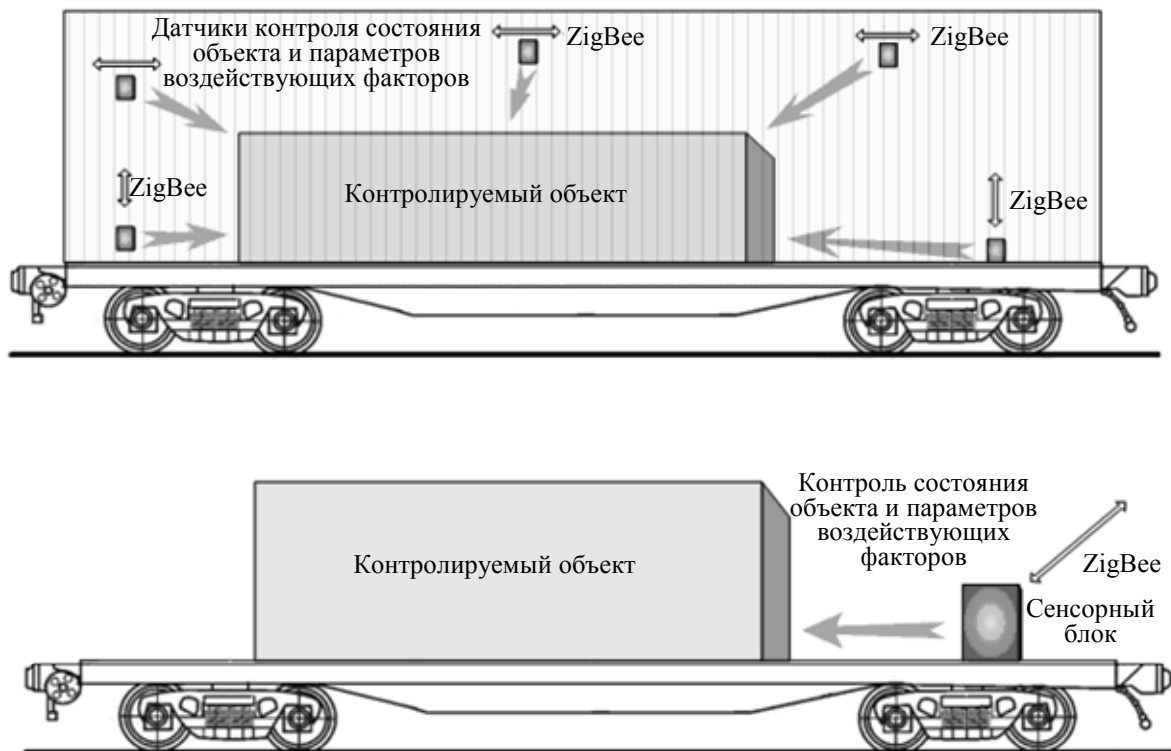


Рис. 3

Основными особенностями микропроцессора вычислительного модуля, входящего в состав беспроводного датчика, работающего по протоколам ZigBee, являются:

- низкое энергопотребление;
- возможность управления энергопотреблением отдельных частей модуля;
- низкая стоимость и малые габариты.

Пакет данных с результатом замеров передается по радиоканалу между ближайшими узлами по цепочке, от узла к узлу, от группы к группе, пока не достигнет конечной точки маршрута. Далее собранная информация поступает в КНТМ в вагоне сопровождения.

Модуль КНТМ предназначен для навигации объекта по данным спутниковой и инерциальной навигационных систем, приема и временного хранения данных телеметрии от датчиков, установленных на контролируемом объекте РКТ, совместной обработки принятой информации. В состав навигационной части КНТМ входят высокочувствительный приемник спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS и малогабаритная бесплатформенная инерциальная навигационная система [10]. В КНТМ полученная информация обрабатывается и передается потребителям по различным каналам связи. В качестве основных систем связи для организации каналов передачи данных используются GSM-сети сотовых операторов России, низкоорбитальной группировки космических аппаратов связи „GlobalStar“, ретрансляторов космических аппаратов „Луч“ или „Inmarsat“. Одновременно с передачей данных на телекоммуникационный

сервер вся текущая информация полностью сохраняется и записывается во внутреннюю энергонезависимую память модуля для дальнейшей обработки.

Разработанный АПК МБСО, основанный на использовании бесконтактных беспроводных датчиков [11—14], самоорганизующихся беспроводных каналов связи, удобен в эксплуатации, практически не требует предварительной подготовки платформ и вагонов, он может быть быстро развернут и свернут на транспортном средстве. Также к достоинствам АПК следует отнести:

- возможность гибкого масштабирования за счет добавления новых устройств или сокращения имеющихся;
- применение беспроводных бесконтактных датчиков с низким энергопотреблением;
- возможность снижения энергопотребления и повышения автономности;
- повышение надежности передачи данных за счет самоорганизации узлов сети;
- надежность определения местоположения объекта РКТ при кратковременной потере сигналов спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС/GPS за счет применения малогабаритного бесплатформенного инерциального модуля.

Заключение. Таким образом, применение систем контроля, работа которых основана на рассмотренном в настоящей статье АПК МБСО, обеспечивает постоянный контроль и оценку состояния объектов РКТ на этапе перевозки железнодорожным транспортом, контроль и предотвращение развития аварийных ситуаций при их возникновении и, как следствие, снижение в целом затрат на мероприятия, обеспечивающие подготовку объектов РКТ к эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайченко Ю. В., Иванов А. С.* Методика комплексной обработки данных о состоянии и координатах объектов космической техники при их транспортировании. М.: НИИ КС, 2014. 28 с.
2. *Макаров С. М., Иванов А. С.* Отчет о НИР. Разработка технического проекта экспериментального образца АПК МБСО состояния объектов КТ и воздействующих факторов при транспортировании различными видами транспорта. М.: НИИ КС, 2014. 225 с.
3. IEEE standard 802.15.4d – 2009.
4. *Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E.* Wireless sensor networks: a survey // *Computer Networks*. 2002. Vol. 38. P. 393—422.
5. *Еркин А.* Разработка распределенных систем контроля датчиков, на основе защищенных низкопотребляющих беспроводных ZigBee-сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic // *Беспроводные технологии*. 2010. № 2. С. 20—24.
6. *Kim S.* Wireless Sensor Networks for Structural HealthMonitoring. Master's thesis. U.C.Berkeley, 2005. P. 24—45.
7. *Панфилов Д., Соколов М.* Введение в беспроводную технологию ZigBee стандарта 802.15.4 // *Электронные компоненты*. 2004. № 12. С. 35—55.
8. *Бараиш Л.* Многообразие стандартов беспроводных технологий // *Компьютерное обозрение*. 2003. № 10. С. 8—12.
9. *Пушкарев О.* ZigBee-модули XBeeSeries 2 с поддержкой Mesh-топологии // *Новости электроники*. 2007. № 16. С. 22—34.
10. *Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В., Скрипников С. Ф., Хмелевская М. И., Буравлев А. С., Кострицкий С. М., Зуев А. И., Варнаков В. К.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // *Гироскопия и навигация*. XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. М., 2014. С. 16—24.
11. *Волович Г. В., Волович А. В.* Интегральные акселерометры // *Компоненты и технологии*. 2002. № 1. С. 66—72.
12. *Аш Ж.* Датчики измерительных систем. Кн. 2. М.: Мир, 1992. С. 254—270.

13. Гудинаф Ф. Интегральный акселерометр на 50 G с самоконтролем, реализованным на нагреваемом возбудителе // *Электроника*. 1993. № 7—8. С. 54—57.
14. Гудинаф Ф. Емкостный датчик ускорения, выполненный на основе сочетания объемной и поверхностной микроструктур // *Электроника*. 1993. № 11. С. 86—87.

Сведения об авторах

- Сергей Михайлович Макаров** — „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; отдел 913; начальник отдела;
E-mail: makarov.sm@niiks.com
- Валерий Григорьевич Шендрик** — „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; заместитель начальника отдела; E-mail: shendrik@niiks.com

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Макаров С. М., Шендрик В. Г. Многоуровневая беспроводная система оценки состояния объектов космической техники при перевозке железнодорожным транспортом // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 7. С. 633—640.

MULTI-LEVEL WIRELESS SYSTEM OF ASSESSMENT OF SPACE TECHNOLOGY OBJECTS STATE DURING RAILWAY TRANSPORTATION

S. M. Makarov, V. G. Shendrik

*A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch
of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC,
141091, Moscow Region, Korolev, Russia
E-mail: makarov.sm@niiks.com*

The features of monitoring the state of rocket and space equipment (RCP), transported by rail, are analyzed. The questions of complex use of methods, technologies and means of navigational definitions are considered on the basis of combined navigation systems, including small-scale inertial-free modules with coordinate correction modules based on GLONASS/GPS signals. The developed experimental model of the hardware-software complex of multi-level wireless system for assessing the state of transported space objects is based on combination of navigation systems with telemetric means of measuring external factors affecting the transported RKT objects. Information about the state of the RCT facility is collected remotely by non-contact sensors with low power consumption. The sensors are integrated into a self-organizing wireless network using radio modules operating under the IEEE 802.15.4 ZigBee standard. This approach allows for the collection and transmission of information on the status of the monitored RCT facility at various levels of control and operational control in a near real time mode.

Keywords: object of rocket and space technology, self-organizing networks, transportation, control settings, external influencing factors, wireless and contactless sensors

REFERENCES

1. Zaychenko Yu.V., Ivanov A.S. *Metodika kompleksnoy obrabotki dannykh o sostoyanii i koordinatakh ob"yektov kosmicheskoy tekhniki pri ikh transportirovani* (Methods of Complex Processing of Data on the State and Coordinates of Space Technology Objects during Their Transportation), Moscow, 2014, 28 p. (in Russ.)
2. Makarov S.M., Ivanov A.S. *Otchet o NIR. Razrabotka tekhnicheskogo proyekta eksperimental'nogo obraztsa APK MBSO sostoyaniya ob"yektov KT i vozdeystvuyushchikh faktorov pri transportirovani razlichnymi vidami transporta* (Report on the Research Work. Development of a Technical Project of an Experimental Sample of a Hardware-Software Complex of a Multi-Level Wireless System for Assessing the State of Space Technology Objects and the Factors Influencing the Transportation by Various Modes of Transport), Moscow, 2014, 225 p. (in Russ.)
3. IEEE standard 802.15.4d – 2009.
4. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. *Computer Networks*, 2002, no. 38, pp. 393–422.
5. Erkin A. *Wireless Technologies*, 2010, no. 2, pp. 20–24. (in Russ.)
6. Sukun Kim. *Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring*, Master's thesis, U.C. Berkeley, 2005, pp. 24–45.
7. Panfilov D., Sokolov M. *Electronic Components*, 2004, no. 12, pp. 35–55. (in Russ.)
8. Barash L. *Komp'yuternoye obozreniye*, 2003, no. 10, pp. 8–12. (in Russ.)
9. Pushkarev O. *Novosti Elektroniki*, 2007, no. 16, pp. 22–34. (in Russ.)

10. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Prilutskiy V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V., Skripnikov S.F., Khmelevskaya M.I., Buravlev A.S., Kostritskiy S.M., Zuyev A.I., Varnakov V.K. *Giroskopiya i navigatsiya. XX Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam* (Gyroscopy and Navigation. XX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems), Moscow, 2014, pp. 16–24. (in Russ.)
11. Volovich G.V., Volovich A.V. *Components & Technologies*, 2002, no. 1, pp. 66–72. (in Russ.)
12. Asch G et al. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 2010, 880 p.
13. Gudina F. *Elektronika*, 1993, no. 7–8, pp. 54–57. (in Russ.)
14. Gudina F. *Elektronika*, 1993, no. 11, pp. 86–87. (in Russ.)

Data on authors

- Sergey M. Makarov** — A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khronichev State Research and Production Space Center JSC, Department 913; Head of the Department; E-mail: makarov.sm@niiks.com
- Valery G. Shendrik** — A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khronichev State Research and Production Space Center JSC; Deputy Head of Department; E-mail: shendrik@niiks.com

For citation: Makarov S. M., Shendrik V. G. Multi-level wireless system of assessment of space technology objects state during railway transportation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 633–640 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-633-640