

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ РАЙОНАХ

ТИТОВ Е.Ю., Российский университет транспорта (МИИТ), канд. техн. наук,
АГАФОНОВ В.М., генеральный директор ООО «Р-сенсорс», канд физ.-мат. наук,
НЕЕШПАПА А.В., ООО «Р-сенсорс», заместитель генерального директора,
АНТОНОВ А.Н., ООО «Р-сенсорс», программист, **ПЕРЕХОДОВ А.П.**, ООО «Р-сенсорс», программист,
КОНАРЕВ А.А., ООО «Р-сенсорс», научный сотрудник

В России немало железнодорожных линий проходит по сейсмически опасным регионам, таким как остров Сахалин, Северный Кавказ, окрестности озера Байкал. Там происходит по 5–6 тыс. сейсмических событий в год. При интенсивных землетрясениях с магнитудой более 7 возможны катастрофические последствия. Чтобы их предотвратить, необходима система контроля состояния объектов инфраструктуры во время и после землетрясений.

Обеспечение безопасной эксплуатации железных дорог в сейсмически опасных районах — это комплексная задача. В России недостаточно сейсмостанций расположено на территориях, подверженных землетрясениям, а их местонахождение никак не связано с транспортными объектами. Вот почему невозможно оценить сейсмические воздействия на сооружения и оперативно принять необходимые меры.

Российский университет транспорта (МИИТ) совместно с ООО «Р-сенсорс» в рамках научного проекта при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований разработали новые измерительные сейсмические комплексы, которые можно применять для непрерывного мониторинга сейсмических воздействий на объекты инфраструктуры.

Как показывает статистика, наибольшее число жертв (человеческих жизней) приходится на первые часы и дни после землетрясений. Именно в этот период новые измерительные комплексы могут обеспечить оценку и контроль состояния искусственных сооружений, что позволит спасательным службам использовать их для своевременного прибытия в районы стихийных бедствий.

При создании системы мониторинга мостов достаточно использовать пять низкочастотных сейсмоприемников за счет значительной доли низкочастотных составляющих в спектрах землетрясений. Необходимо расположить по одному датчику у опор на расстоянии, достаточно удаленном от фундаментов, чтобы записать колебания свободного поля при землетрясении. Вместе с тем датчики должны находиться на глубине, позволяющей оценить волны, действующие на фундаменты мостов. Параметры таких колебаний очень важны, так как учитывают местные геологические условия: типы грунтов и возможные резонансные усиления в слоистых средах. Данные

даже о слабых землетрясениях, полученные этими датчиками, передают на центральный пункт для обработки и уточнения сейсмических воздействий на сооружение.

В местах контакта пролетных строений и опор располагают по одному датчику, которые позволяют получить поэтажные спектры ответов для оценки колебаний пролетных строений с разной подвижной нагрузкой во время землетрясения, а также относительные спектры максимальных перемещений смежных пролетных строений. Это дает возможность предотвратить их сброс и соударение, изменив в необходимых случаях размеры зон опирания и величину зазоров. В центре пролета также должен находиться датчик. Все датчики должны быть трехкомпонентными.

Тоннели в меньшей мере повреждаются при землетрясениях по сравнению с наземными сооружениями. Тем не менее разрушения могут быть значительными. Для системы мониторинга тоннелей применяются пять низкочастотных сейсмоприемников. При оценке реакции тоннелей на землетрясения важную роль играют пиковые перемещения DPG и пиковые скорости VPG , поэтому при разработке программного обеспечения предусмотрено вычисление этих параметров, а также спектров Фурье. Спектры ответов при оценке воздействий землетрясений на подземные сооружения не используются.

Следует рассмотреть два случая расположения тоннелей: в сплошных массивах и в местах пересечения зон активных разломов. При сейсмических воздействиях тоннели могут испытывать три вида деформаций: продольные, изгибные и сдвига. В связи с этим желательно использовать трехкомпонентные датчики, которые для оценки необходимых параметров следует расположить по одному у концов тоннеля, а остальные — вдоль него по всей длине.

Измерительные комплексы состоят из модулей и включают:

цифровые сейсмические датчики (акселерометры и сейсмометры), функционирующие как автономно, так и в составе информационных сетей, служащих для передачи данных в режиме реального времени или близком к нему;

коммуникационные устройства, обеспечивающие действие цифровых датчиков в составе сетей реального

времени и совместимость их с локальными средствами, создающими условия для безопасной работы объектов;

программное обеспечение, позволяющее получать информацию в режиме реального времени и передачу ее в стандартных форматах данных;

средства обработки данных и принятия решений.

Реализация проекта заключалась в создании цифрового сейсмометра СМЕ-4211ND, включающего блок сейсмических датчиков и цифровую систему к нему. В основу разработки положены схемотехнические решения и настройки, обеспечивающие максимальную надежность в эксплуатации, устойчивость к ударным нагрузкам при транспортировке, возможность применения в широком диапазоне частот.

В основе блока сейсмических датчиков применены молекулярно-электронные преобразователи. Система датчиков состоит из вертикального молекулярно-электронного преобразователя с электродинамической обратной связью и двух ортогонально установленных горизонтальных молекулярно-электронных преобразователей керамического типа. Конструкция блока чувствительных элементов прочна и надежна.

Для используемых датчиков приняты следующие ключевые параметры цифровых систем: синхронная регистрация данных по трем каналам; динамический диапазон аналого-цифрового преобразования — 134 дБ; входной диапазон — ± 10 В; нелинейность на 1 Гц — до 60 дБ; интерфейсы передачи данных — USB, Wi-Fi.

Учитывая, что разрабатываемые устройства будут применяться в полевых условиях, цифровая система имеет следующие особенности: возможность автономной записи сигнала на встроенную карту памяти; интеграцию сейсмических датчиков и цифровых систем в едином корпусе; малое энергопотребление; возможность питания как от стандартного аккумулятора, так и от порта USB.

Привязка данных к точному времени осуществляется посредством синхронизации часов системы с временем GPS. В дополнение предусмотрена схема автоматической коррекции частоты тактового гене-

ратора для компенсации дрефта времени отсчетов.

Для облегчения эксплуатации прибора в полевых условиях на лицевую панель выведено два светодиода, сигнализирующих о режиме записи, возможных ошибках и текущем состоянии часов устройства.

Разработка цифрового акселерометра

В качестве сейсмодатчика был использован высокочувствительный акселерометр с частотой до 120 Гц молекулярно-электронного типа производства ООО «Р-сенсорс». В конструкцию устройства и его электронные схемы следовало внести необходимые изменения, а также объединить его в одном корпусе с регистрирующей электроникой. Оборудование также включало плату от цифрового сейсмометра СМЕ-4211ND и три однокомпонентных молекулярно-электронных акселерометра типа MTSS-1031A.

Акселерометры к плате цифрового сейсмометра были подключены при помощи разработанной и изготовленной интерфейсной платы, основная задача которой заключалась в обеспечении напряжений питания, необходимых для работы акселерометров, а также объединении сигналов трех отдельных акселерометров и вывод их на совместимый с цифровой платой разъем. Для повышения чувствительности акселерометров и снижения влияния высокочастотных наводок на регистрируемый сигнал применена дифференциальная схема подключения преобразователей к аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Акселерометры размещены ортогонально вдоль осей чувствительности прибора на основании и уголке. В основание вкручены шпильки, которые обеспечивают крепление цифровой платы. Внутренняя конструкция приведена на рис. 1.

Устройство помещено в герметичный корпус типа Gainta G139. Для обеспечения работы на корпус выведены разъем питания, USB, GPS, Wi-Fi антенна и светодиодные индикаторы.

Устойчивую работу прибора от источника напряжения питания с широким диапазоном входного напряжения обеспечил дополнительный DC/DC преобразователь 9-36/5В типа TEN3 мощностью 3 Вт. При питании прибора от компьютера рекомендовано использовать одновременное подключение обоих имеющихся на цифровой плате портов, получив таким образом удвоенную нагрузочную способность. Как подтвердили исследования, прибор стабильно функционирует при пиковых потреблении аналоговой части.

После модернизации схем и сборки прибора для оценки качества получаемого сигнала было проведено сравнение показателей акселерометра и эталонного сейсмометра типа СМЕ-6111 (ООО «Р-сенсорс»). Для оценки уровня шума взяты спектры данных, полученных приборами в течение 1 ч в ночное время. Сравнение спектров (рис. 2) обнаружило совпадение сигналов в промежутке от 2 до 12,5 Гц. Уровень собственных шумов акселерометра регистрируется в диапазоне от -100 до -110 Дб относительно 1 м/с². При частоте от 12,5 до 100 Гц в сигнале акселерометра присутствуют высо-

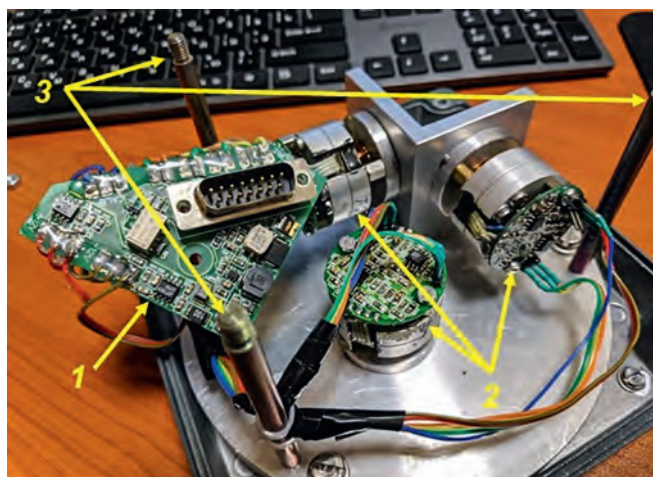


Рис. 1. Акселерометры и интерфейсная плата:
1 — интерфейсная плата; 2 — однокомпонентные акселерометры; 3 — шпильки крепления цифровой платы

кочастотные компоненты большей интенсивности по сравнению с сейсмометром.

Преимуществом объединения в одном корпусе сейсмодатчиков и системы регистрации является высокая надежность, удобство использования и низкая себестоимость изделия. Помимо этого, за счет более высокой границы частотного диапазона достигнуто лучшее разрешение сигналов при частоте выше 12,5 Гц. Данная система имеет меньшее время выхода на рабочий режим (5—10 с в сравнении с 5—15 мин у сейсмометра) и способна регистрировать сигналы значительно большей интенсивности.

Окончательный макет цифрового акселерометра был испытан в лаборатории и в полевых условиях. В ходе испытаний подтвердилась оптимальность прибора для построения систем мониторинга и определения необходимой исходной сейсмической информации.

Модуль передачи данных в режиме реального времени

Для передачи данных в режиме реального времени был создан специализированный программируемый модуль. Основные технические требования, предъявляемые к нему: возможность обработки сигнала и детектирования сейсмических событий, передача информации о событиях через существующие проводные и мобильные сети России на центральный диспетчерский пульт. При разработке модуля была выбрана концепция, обеспечивающая максимальную гибкость его конфигурирования для расширения возможных областей применения.

В рамках выбранной концепции основой модуля является миниатюрный компьютер, функционирующий под управлением операционной системы Linux. Использование устройства с Linux позволяет устанавливать любое необходимое программное обеспечение для работы в сети, гибко конфигурировать сетевые функции, а также поддерживать различные периферийные устройства. Основной сферой применения модуля является работа с поддерживаемым подключением к интернету.

В качестве аппаратной платформы был выбран одноплатный компьютер BeagleBone Green, характеризующийся невысоким энергопотреблением, низкой стоимостью и большим количеством периферийных портов. Для него разработана электронная плата, на которой размещены (рис. 3):

- два USB порта для подключения внешних устройств, в том числе цифровых устройств серии NDAS;

- два слота для подключения карт расширения формата mini PCI-E — 3G/4G модемов, Wi-Fi адаптеров, SSD-накопителей и др., слот для сим-карты;

- шесть вспомогательных каналов АЦП для измерения дополнительных параметров окружающей среды.

Электронная плата позволяет реализовать следующие функции:

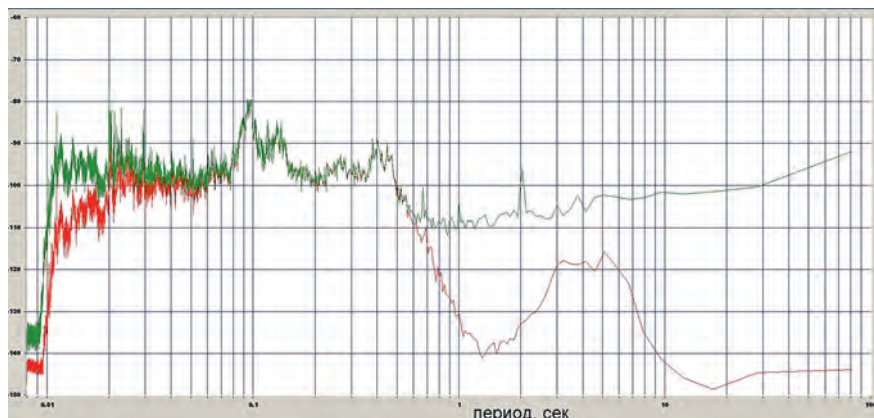


Рис. 2. Спектры записи фона Земли. Вертикальная компонента: красная линия — эталонный сейсмометр, зеленая — собранный акселерометр

- самодиагностику устройства (измерение напряжения питания, потребляемого тока, температуры и влажности внутри корпуса);

- поддержку питания посредством технологии Power over Ethernet;

- поддержку интерфейсов RS-485/CAN для соединения с удаленными устройствами NDAS и подключения к промышленным сетям инфраструктуры объекта мониторинга.

Программное обеспечение для модуля передачи данных в режиме реального времени

Решение этой задачи базируется на концепции максимальной гибкости. Программное обеспечение устройства разбито на основную (менеджер устройства) и отдельные программы (модули), выполняющие конкретные функции. Интерфейс отображается в виде веб-страниц, которые можно открыть в любом браузере при удаленном подключении. Для этого в менеджер устройства встроены веб-сервер. В качестве языка программирования использовался Python, обладающий рядом преимуществ, таких как возможность использования открытого кода программы без необходимости компиляции исполняемого файла,



Рис. 3. Плата с установленными на ней одноплатным компьютером BeagleBone Green, 3G модемом Huawei и сим-картой оператора Мегафон

простота программирования, хорошая читаемость кода. Это позволяет легко вносить изменения и доработки в программу, создавать новые программы и таким образом расширять функциональность устройства.

Программное обеспечение системы

Программное обеспечение состоит из трех базовых программ:

первая — менеджер устройств NDAS. Ее основной функцией является установка соединения с цифровым сейсмодатчиком и прием данных в режиме реального времени;

вторая — анализатор сигнала. Она выполняет обработку поступающих данных и определяет наличие сейсмического события;

третья — сервер SeedLink, обеспечивающий возможность удаленного скачивания сейсмических данных в наиболее распространенном формате miniSeed и интеграции устройства в сеть сейсмодатчиков.

Принцип работы системы

Сигнал, поступающий от менеджера устройства NDAS, буферизируется. Размер буфера выбирается таким образом, чтобы обеспечить возможность сохранения участка записи до срабатывания триггера. Этот же сигнал в режиме реального времени подается на цепь детектирования события. Вначале происходит фильтрация сигнала полосовым фильтром, позволяющим отделить ту часть спектра, которая находится за рабочей полосой частот.

Предусмотрено два различных варианта детектирования: STA/LTA и RMS. В первом случае с пороговым значением сравнивается отношение среднего арифметического значения сигнала на коротком времени усреднения к среднему арифметическому значению на длинном времени усреднения. Во втором случае с пороговым значением сравнивается среднее квадратическое значение сигнала. Описанные операции применяются к сигналам по каждому из каналов.

Результатом выполнения анализа являются флаги



Рис. 4. Система в сборе:
слева — цифровой акселерометр, справа — модуль реального времени с подключенной LTE-антенной

срабатывания для каждой из осей сейсмодатчика, показывающие наличие события. Таким образом, выходными данными алгоритма детектирования события являются время начала и окончания события. На основе этих данных выполняются два действия: отправка СМС на заданный номер с информацией о времени начала; отправка и(или) сохранение участка записи, соответствующего данному интервалу времени.

Окончательный макет цифрового акселерометра с модулем передачи данных в режиме реального времени представлен на рис. 4.

Выводы

Таким образом, один из основных результатов проекта — создание макета измерительного комплекса для системы сейсмического мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры. Эксперименты проводились в различных условиях: в лабораториях, в тоннелях метро, на мостах и вблизи мостов, на железнодорожных насыпях. Новизной системы является использование высокочувствительного молекулярно-электронного сейсмического акселерометра в качестве измерительного элемента и модуля передачи данных в режиме реального времени на основе одноплатного компьютера под управлением Linux. Преимущества использованных технических решений — возможность наблюдать низкочастотную составляющую спектра колебаний объекта, вести непрерывное наблюдение за объектом с передачей сейсмических данных по проводным или беспроводным сетям, определять сейсмические события и отправлять сообщения оператору системы в режиме реального времени. Отличительная особенность комплекса — гибкое конфигурирование для каждого объекта мониторинга.

Список источников

1. Курбацкий Е.Н., Пестрякова Е.А. Состояние нормативной документации по расчету транспортных сооружений на сейсмические воздействия // Метро и тоннели. 2016. № 2. С. 24–31.
2. AASHTO LRED Bridge Design Specification / American Association of State Highway and Transportation Official. 6th ed. Washington, DC, 2012. 1661 p.
3. Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Yanovich A.A. Application of seismometric methods at inspection of constructive integrity of engineering constructions // From New Ideas to New Discoveries : 3rd Saint Petersburg International Conference and Exhibition, 2008. Red Hook, NY : Curran Associates, Inc., 2008. P. 732–737.
4. Geo-ecological infrasound monitoring of highways and surrounding areas / S.A. Rybak, O.V. Rudenko, A.L. Sobissevitch, L. Ye. Sobissevitch // Acoustics Letters. 2000. Vol. 23, № 10. P. 197–200.
5. Agafonov V., Neeshpapa A., Shabalina A. Electrochemical seismometers of linear and angular motion // Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin; Heidelberg : Springer, 2015. P. 944–961. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_403-1.
6. Agafonov V.M., Egorov I.V., Shabalina A.S. Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback // Seismic Instruments. 2014. Vol. 50, no. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923914010022>.
7. Egorov I.V., Shabalina A.S., Agafonov V.M. Design and self-noise of MET closed-loop seismic accelerometers // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17, no. 7. P. 2008–2014. doi: 10.1109/JSEN.2017.2662207.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ РАЙОНАХ

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, землетрясения, железные дороги, безопасность, инфраструктура, сейсмология, сейсмотащики, сейсмические акселерометры, сейсмические регистраторы, системы мониторинга, сейсмические события.

Титов Евгений Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта (МИИТ), заместитель председателя — ученый секретарь Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» (АО «ВНИИЖТ»). Москва, Россия. E-mail: etitov80@gmail.com

Агафонов Вадим Михайлович — канд. физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «Р-сенсорс». Москва, Россия. E-mail: agvadim@yandex.ru

Неешпапа Александр Владимирович — заместитель генерального директора ООО «Р-сенсорс». Москва, Россия. E-mail: alexn@r-sensors.ru

Антонов Александр Николаевич — программист ООО «Р-сенсорс». Москва, Россия. E-mail: antonov.mipt@gmail.com

Переходов Алексей Павлович — программист ООО «Р-сенсорс». Москва, Россия. E-mail: perekhodovalexey@gmail.com

Конарев Андрей Александрович — научный сотрудник ООО «Р-сенсорс». Москва, Россия. E-mail: ak@r-sensors.ru

Аннотация. Для системы сейсмического мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры был создан и опробован макет измерительного комплекса. Новизной системы явилось применение высокочувствительного молекулярно-электронного сейсмического акселерометра в качестве измерительного элемента и модуля передачи данных в реальном времени на основе одноплатного компьютера под управлением Linux. Преимущества использованных решений — возможность наблюдения низкочастотной составляющей спектра колебаний объекта, непрерывное наблюдение за объектом с передачей сейсмических данных по проводным или беспроводным сетям, определение сейсмических событий и отправка сообщений оператору системы в режиме реального времени. Отличительная особенность комплекса — гибкое конфигурирование для каждого объекта мониторинга.

MEASURING COMPLEXES TO MONITOR RAILWAY FACILITIES IN SEISMICALLY HAZARDOUS REGIONS

Keywords: seismic monitoring, earthquakes, railways, security, infrastructure, seismology, seismic sensors, seismic accelerometers, seismic data loggers, monitoring systems, seismic events.

Titov Evgeniy — Ph.D., associate professor, Bridges and Tunnels department, Russian University of Transport (MIIT), Vice-Chairman — academic secretary of the Joint Scientific Council, Railway Research Institute of Russian Railways, Moscow, Russia. E-mail: etitov80@gmail.com

Agafonov Vadim — Ph.D. in physics and math sciences, general director, R-sensors LLC, Moscow, Russia. E-mail: agvadim@yandex.ru

Neeshpapa Alexander — deputy general director, R-sensors LLC, Moscow, Russia. E-mail: alexn@r-sensors.ru

Antonov Alexander — software developer, R-sensors LLC, Moscow, Russia. E-mail: antonov.mipt@gmail.com

Perekhodov Alexey — software developer, R-sensors LLC, Moscow, Russia. E-mail: perekhodovalexey@gmail.com

Konarev Andrey — researcher, R-sensors LLC, Moscow, Russia. E-mail: ak@r-sensors.ru

Abstract. A model of the measuring complex was created and tested for the seismic monitoring system of railway infrastructure facilities. The novelty of the system was the use of a highly sensitive molecular electronic seismic accelerometer as a measuring element and a real-time data transfer module based on a single-board Linux-run computer. The advantages of the used solutions are capabilities to observe a low-frequency component of the facility's vibration spectrum, continuous monitoring of the facility along with transfer of seismic data over wired or wireless networks, detection of seismic events and sending messages to the system operator in real time. A distinctive feature of the complex is a flexible configuration for each monitoring facility.