

Методика построения информационных сервисов высокоточного мониторинга механической безопасности конструкций сложных инженерных сооружений

А. И. Васильев, М. М. Березенцев, С. Ю. Калинин

АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия
E-mail: csmou@spacecorp.ru

Статья относится к области исследований механической безопасности строительных конструкций в части мониторинга смещений и деформаций элементов сложных инженерных сооружений (СИС), таких как мосты и эстакады, плотины, большепролётные сооружения и здания высотной структуры, объекты эксплуатации в условиях крайнего севера, шельфовой зоны, на космодромах. Построение информационных сервисов высокоточного мониторинга смещений и деформаций СИС основано на применении сервис-ориентированной архитектуры программного обеспечения, а также технологий интеллектуального анализа данных, включая обработку больших массивов данных и потоковых измерений в масштабе псевдореального времени. Работу сервисов обеспечивает измерительный комплекс, в состав которого могут быть включены как традиционные для этой области прецизионные измерители физических величин, так и измерители, работающие при поддержке глобальных навигационных спутниковых систем. Кроме того, работу сервисов обеспечивают технологии моделирования кризисных ситуаций на виртуальных образах СИС. Конечной целью создания подобных информационных сервисов является предоставление данных, необходимых для оценки механической безопасности конструкций инженерных сооружений, ведомствам и отдельным предприятиям, участвующим в организации исполнения функций по сопровождению жизненных циклов СИС.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, мониторинг смещений и деформаций инженерных сооружений, риск обрушения, информационный сервис

Одобрена к печати: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-83-91

Введение

Построению программно-аппаратных комплексов, имеющих функции оценки механической безопасности строительных конструкций, посвящается большое количество отечественных и зарубежных работ (см., например, публикации (Антонович, Карпик, 2003; Багаутдинова и др., 2012; Большаков и др., 2011; Жодзишский и др., 2013; Носкова, Токранова, 2017; Сопегин, Сурсанов, 2017; Ягер и др., 2012; Gumus, Selbesoglu, 2019)). В части высокоточного мониторинга смещений и деформаций сложных инженерных сооружений (СИС) нашли применение высокоточные интегрированные измерители на основе приёмников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) (наиболее распространены GPS (Global Positioning System, система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система)) и ряда дополнительных датчиков (акселерометры, инклинометры и др.) на одной платформе (далее — ГНСС-модули). В работе (Ягер и др., 2012) представлена такая мультисенсорная система (GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System), которая используется для мониторинга и анализа деформаций объектов в режиме реального времени на основе результатов геодезических измерений, полученных с использованием спутниковых навигационных систем GNSS/GPS, электронных тахеометров (LPS — Local Position System), обычных и гидростатических нивелиров, а также локальных сенсоров (*англ.* local sensor). Зарубежный опыт создания систем мониторинга конструкций на многих примерах приведён в публикациях (Антонович, Карпик, 2003; Сопегин, Сурсанов, 2017), где особо отмечены продукты фирм Leica (GeoMoS), Trimble (4DC), а также Канадского центра инженерной геодезии (*англ.* Canadian Centre for Geodetic Engineering — CCGE), в частности

система Alert, которая использовалась при мониторинге плотин на оз. Даймонд Вэлли (*англ.* Diamond Valley) с точностью измерения смещений контрольных точек элементов конструкции не хуже 5 мм.

Отечественная система высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений (ВМСИС) (Большаков и др., 2011) реализует возможность прецизионного определения координат контролируемой точки относительно опорной точки по фазовым измерениям несущей частоты навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS. По результатам испытаний система обеспечивала: слежение за смещениями контролируемой точки по трём пространственным координатам с погрешностью 2–3 мм; определение спектральных характеристик колебаний (в том числе резонансных частот) в диапазоне частот 0,1–10 Гц с максимальной погрешностью не более 1 мм. Среднеквадратичное отклонение оценки изменения базовой линии в квазиреальном масштабе времени составило: по широте и долготе — 2 мм, по высоте — 4 мм. Результаты показаний системы ВМСИС отмечены хорошей сходимостью при одновременной работе с акселерометрами и тензометрическими датчиками.

Достигнутый уровень программно-технической реализации ГНСС-модулей, как отечественный, так и зарубежный, позволяет с уверенностью говорить о создании аппаратной части информационного обеспечения для сервисов ВМСИС.

Понятийный аппарат и критерии оценки уровня механической безопасности строительной конструкции

При построении информационного сервиса ВМСИС необходимо придерживаться стандартов, регламентированных Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», где прописано: «Мониторинг смещений и деформаций элементов конструкции сложных инженерных сооружений (СИС) проводится с целью оценки уровня механической безопасности СИС для принятия последующих решений» (Технический..., 2009).

Механическая безопасность в регламенте определяется как состояние строительных конструкций и их оснований, при котором отсутствует недопустимый риск для граждан, их имущества и окружающей среды вследствие потери устойчивости и разрушения строительной конструкции или её части. Внешними факторами, оказывающими влияние на деформации строительных сооружений, являются изменение силы и направления ветра, осадки в виде дождя и снега, сейсмические толчки и транспортная нагрузка, а также изменение погодных условий (перепады температуры, количество осадков, солнечное излучение). Воздействие внешних факторов приводит к необратимому износу несущих элементов конструкции сооружения, а при сверхнормативных нагрузках — к необратимым деформациям, потере устойчивости и разрушению конструкции.

Одни только смещения и деформации не дают полной картины технического состояния СИС. Необходимо также получать оценки динамических параметров, характеризующих динамические свойства сооружений. Эти свойства проявляются при динамических нагрузках, а параметры включают периоды и декременты собственных колебаний основного тона и обертонов, а также передаточные функции объектов, их частей и элементов.

Учитывая основные положения технического регламента (Технический..., 2009), в качестве агрегированного критерия оценки уровня механической безопасности строительной конструкции целесообразно выбрать риск наступления предельного состояния, при котором дальнейшая эксплуатация СИС опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна. Такое предельное (аварийное) состояние характеризуется повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения конструкции, а также кренами, которые могут вызвать потерю устойчивости объекта.

Проблема оценки риска включает в себя две независимые задачи: определение вероятности отказа и оценку его последствий. Оценка последствий наступления отказа конструкции (элемента конструкции) — это инженерно-экономическая задача, которая не является

необходимой для оценки уровня механической безопасности. Поэтому под оценкой риска предлагается понимать вероятность наступления негативных последствий, вызванных отказом одного или нескольких элементов конструкции. Для определения вероятности отказа выполняют вероятностный расчёт строительных конструкций, опираясь на данные о внешних воздействиях, характеристиках материалов и несовершенстве геометрических параметров конструкций. Для большинства строительных конструкций определение вероятности отказа хорошо поддаётся математической формализации и может быть оценено с помощью конечно-элементного моделирования.

Ключевым элементом информационного сервиса ВМСИС является исходный набор параметров мониторинга и их предельные (пороговые) значения, полученные в результате математического моделирования. Построение конечно-элементной модели позволяет исследовать влияние нагрузок на изменение напряжённо-деформированного состояния элементов конструкции, выявить влияние повреждений отдельных элементов конструкции на изменение напряжённо-деформированного состояния остальных элементов, оценить влияние внешних воздействий и нагрузок на смещения (перемещения, прогибы) элементов конструкций. В результате моделирования получается набор данных, включающий:

- предельно допустимые напряжения в элементах конструкции под нагрузкой;
- предельные значения перемещений узлов элементов конструкции;
- расчётные частоты собственных колебаний конструкции.

В качестве локальных критериев допустимо выбрать пороговые значения параметров мониторинга с учётом их весовых коэффициентов. Подобный подход допускает автор теории надёжности сооружений, изложенной в книге (Райзер, 2010), ссылаясь на методику расчёта предельных состояний строительной конструкции.

Предпосылки для создания информационного обеспечения сервисов ВМСИС

Исходные данные для расчёта риска могут быть получены посредством использования технологии моделирования кризисных ситуаций на виртуальных образах СИС. Современные технологии имитационного моделирования инженерных сооружений (ВІМ-технологии (building information modeling)) позволяют оперировать с виртуальными образами строительных конструкций, закладывая различные кризисные сценарии. При моделировании учитываются и внешние факторы, и реологии, и статистические данные о превышении пороговых значений параметров мониторинга (локальные критерии), полученные обработкой накопленных массивов данных измерительного комплекса. Учитывая особенности подобной постобработки измерений, оценки рисков могут быть получены только апостериорно по факту завершения процедур анализа. Однако для части сервисов ВМСИС возможен и режим псевдореального времени для получения оценок механической безопасности СИС по локальным критериям на основе динамической (калмановской) фильтрации данных измерительного комплекса, как это декларируется в работах (Большаков и др., 2011; Сопегин, Сурсанов, 2017; Ягер и др., 2012).

Патенты на изобретения систем ВМСИС (Багаутдинова и др., 2012; Жодзишский и др., 2013) могут послужить прототипами измерительного комплекса. Опытный образец системы (Жодзишский и др., 2013) прошёл этап опытных демонстрационных испытаний межведомственной комиссией с открытым опубликованием полученных результатов (Большаков и др., 2011) и позднее был запущен в серийное производство. В настоящее время ряд таких систем успешно эксплуатируется на мостовых сооружениях в России. Система проводит опрос измерителей в режиме реального времени (*англ.* realtime) с последующей обработкой и сохранением информации в базе данных. Используемое для этого программное обеспечение класса SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, программное обеспечение для построения систем диспетчеризации и управления) реализует и диспетчерские функции: отображение на экране превышений установленных порогов и светозвуковое оповещение о тревогах.

Нежелательной, но всё же реальной альтернативой отечественным системам представляется использование импортных систем ВМСИС. Одним из лидеров в этой области является швейцарская компания Leica Geosystems. Её программная система мониторинга LeicaGeoMoS, конфигурируемая под конкретное применение, обеспечивает функционирование достаточно гибкой автоматической системы контроля деформаций, которая обрабатывает измерения от комплекса датчиковой аппаратуры фирмы Leica (ГНСС-приёмников, тахеометров, геотехнических и метеорологических сенсоров) (Носкова, Токранова, 2017).

Рекомендации по формированию исходных данных для проектирования

В процессе формирования исходных данных для проектирования информационных сервисов ВМСИС учитывают: особенности строительной конструкции, её функциональное назначение и цели проведения мониторинга; скорость протекания контролируемых процессов и их изменение во времени; продолжительность и ошибки измерений; динамику изменения состояния окружающей среды; влияние наведённых помех и аномалий природно-техногенного характера. Кроме того, в ходе длительных наблюдений необходимо учитывать изменение внешних условий (температурных, влажностных и прочих) и обеспечивать компенсационные поправки для измерительных устройств. Для определения динамических характеристик сооружений анализируют реакцию строительной конструкции на подвижные, ударные, вибрационные, ветровые и другие нагрузки, способные вызвать появление устойчивых колебаний (в том числе свободных). В процессе мониторинга деформаций оснований фундаментов в критических точках конструкции должны быть измерены следующие величины: вертикальные перемещения (осадки, сдвиги, просадки, подъёмы, прогибы и т. п.); горизонтальные перемещения (сдвиги); наклоны (крены).

В качестве информационных ресурсов для сервиса ВМСИС используются данные измерительного комплекса, в состав которого необходимо включить измерители статических характеристик напряженно-деформированного состояния в необходимом количестве, а также измерители динамических характеристик (для СИС, испытывающих подвижные, ударные, вибрационные, ветровые и другие нагрузки).

Следует принять к сведению, что ГНСС-модули обеспечивают оба типа измерений, но лишь отчасти. В числе статических характеристик могут быть измерены: общие перемещения и деформации элементов конструкции (пролётных строений, опор и т. д.); относительные деформации, характеризующие напряжения в элементах конструкции; угловые и взаимные сдвиги частей сооружения. В числе динамических характеристик — спектральные характеристики колебаний контролируемых элементов СИС под динамической нагрузкой (во время прохождения железнодорожных составов по мостовым сооружениям, воздействия порывистых ветровых нагрузок и т. п.).

Технологии интеграции измерительной информации от разнородной датчиково-преобразующей аппаратуры

Измерения от всех доступных источников, как правило, отличаются несопоставимостью и распределённым характером. Однако для работы специализированных информационных сервисов ВМСИС возникает потребность в агрегированной и качественной информации, получаемой в результате интеграции и последующей обработки совокупности разнородных данных. Потребности в интеграции информации можно удовлетворить с помощью нескольких концепций и технологий. Одна из таких технологий — интеграция данных (*англ.* data federation) (Носкова, Токранова, 2017). Она предназначена для эффективного объединения информации от нескольких разнотипных источников без перемещения данных. Шаблон интеграции данных поддерживает операции с интегрированным и временным (виртуальным)

представлением данных, хранящихся в нескольких различных источниках. Исходные данные остаются под контролем систем-источников и считываются по требованию сервиса. Сервисы при этом обращаются к единому виртуальному источнику данных.

Применение принципа интеграции также приводит к расширению вариативности использования сервисов ВМСИС потребителями. Последние могут иметь одинаковые или подобные потребности в интегрированной информации, но вместе с тем каждый из них может получить собственную реализацию для агрегации информации из разнородных источников. Интегрированное представление разрабатывается единожды и после этого используется многократно и обслуживается централизованно. Результат обращения к шаблону интеграции данных может быть предоставлен в виде сервиса для нескольких потребителей.

Реализация принципов интеграции зачастую осуществляется разработчиками сервисов посредством программных средств, поддерживающих семейство протоколов OPC (Open Platform Communications), либо язык запросов SQL, либо и то и другое. Поток измерительных данных после обработки калмановскими фильтрами должен быть разделён на актуальную и историческую составляющие, поскольку нельзя назвать эффективным хранение всей полученной в результате обработки информации в одном хранилище, что может существенно понизить производительность сервисов. По этой причине текущие сглаженные оценки измерений содержатся в SQL-хранилище (реляционных базах данных), тогда как исторические данные автоматически вытесняются на хранение в электронные архивы. Это никак не мешает созданию сервисов мониторинга и прогнозирования, поскольку благодаря принципу интеграции им и не нужно знать о таком распределении данных.

Рекомендации по архитектурному построению системы интеграции данных

В системах интеграции данных наибольшее распространение получила архитектура с посредником (Когаловский, 2010). На посредника возлагается задача поддержки единого пользовательского интерфейса на основе глобального представления данных, содержащихся в источниках, а также поддержки отображения между глобальным и локальным представлениями данных. В качестве такого посредника в системах ВМСИС могут быть использованы: драйверы, обеспечивающие получение данных в реальном масштабе времени от измерительного комплекса по поддерживаемым протоколам обмена; OPC-сервер, дающий возможность интегрировать в единую систему неоднородные источники данных и узлы управления (хранилища данных); механизмы репликации баз данных, позволяющие связывать систему управления базами данных (СУБД) реального времени и реляционные хранилища данных; SCADA-системы, объединяющие все вышеперечисленные инструменты взаимодействия с источниками данных и узлами управления.

На практике используются две разновидности архитектуры с посредником: глобальная и локальная. Глобальная архитектура предусматривает определение глобального представления интегрированных данных в терминах заданных представлений локальных источников. Такой подход более эффективен в случае, когда множество всех используемых источников предопределено. Если система интеграции предназначена для поддержки полного материализованного представления интегрируемых данных, процессы конверсии данных из источников в их единое глобальное представление осуществляются одновременно.

При использовании локальной разновидности архитектуры предполагается, что представление для каждого из локальных источников данных определяется в терминах заданного интегрирующего глобального представления. Хотя в этом случае усложняется отображение пользовательских запросов в среду локальных источников данных, такой подход допускает динамичность состава множества источников данных. Каждый новый источник может подключаться к системе как на стадии разработки, так и на стадии функционирования.

В системах интеграции данных широко используется ряд официальных международных стандартов, а также промышленных стандартов де-факто. Среди них стандарты баз данных

ISO/IEC SQL, ISO/IEC SQL/MED, стандарт объектных данных консорциума ODMG, стандарты CORBA и UML консорциума OMG, стандарты платформы XML консорциума W3C, стандарт Дублинского ядра консорциума OCLC и многие другие.

Методика реализации веб-сервисов ВМСИС

При реализации веб-сервисов требуется определить необходимый для разработки применяемых технологий программирования и протоколов информационного взаимодействия стек исходя из принятой архитектуры построения веб-сервиса.

1. Выбор протоколов обмена. На сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие протоколы для веб-сервисов: SOAP (Simple Object Access Protocol) — протокол, созданный на основе стандартов SOAP, WSDL (Web Service Definition Language), UDDI (Universal Description Discovery and Integration); REST (Representational State Transfer) — протокол, основанный на теории манипуляции объектами CRUD (Create, Read, Update, Delete) и стандартах и протоколах HTTP (HyperText Transfer Protocol), URI (Uniform Resource Identifier), XML (eXtensible Markup Language) и RDF (Resource Description Format). Выбор между двумя протоколами можно упростить, если определиться со следующим. Протокол SOAP более применим в сложных архитектурах, в которых взаимодействие с объектами выходит за рамки теории CRUD, где требуется особая надёжность и безопасность при передаче данных. Однако в наиболее простой реализации веб-сервисов вполне применим протокол REST ввиду своей простоты и прозрачности. Кроме того, REST по сравнению с SOAP показывает лучшую производительность, так как не требует затрат на разбор сложных XML-команд на сервере (выполняются обычные HTTP-запросы PUT, GET, POST, DELETE). В веб-сервисах REST акцент сделан на доступ к ресурсам, а не на исполнение удалённых процедур. И всё же удалённый вызов процедур применим и в REST. Кардинальное отличие его от SOAP в том, что REST остаётся HTTP-запросом.
2. Выбор технологии для построения веб-сервисов. Выбор технологии определяется идеологиями, заложенными в современные средства программирования на языках PHP5, JAVA с применением технологий программирования и фреймворков (программных пакетов) ASP.NET, AJAX, jQuery и ряда других. Можно порекомендовать использовать связку PHP5, Zend Framework, AJAX, JSON и СУБД PostgreSQL для создания веб-сервиса ВМСИС. Далее посредством веб-сервиса данные передаются сторонним приложениям для отображения в удобном виде.
3. Для реализации веб-сервиса REST можно использовать пакет Zend Framework, в который включена реализация как REST-клиента, так и REST-сервера. В состав пакета входит уже готовый класс CurrencyExchange, с помощью которого создаётся сервер. Минимальное описание API (Application Programming Interface, интерфейс программирования) для веб-сервиса включает также документ DTD (Document Type Definition), в котором заданы тип и структура ответов веб-сервиса в формате XML.
4. Реализация веб-сервиса SOAP также возможна для ВМСИС в дополнение к REST. Для этого может использоваться встроенный в PHP5 пакет для работы с SOAP. Для публичного доступа к веб-сервису создаётся WSDL-файл, который описывает структуру веб-сервиса. Протокол WSDL — это XML-файл определённого формата, генерация которого возможна в среде IDE Zend Studio for Eclipse из классов PHP, реализующих функциональность веб-сервиса.

Заключение

Информационный сервис ВМСИС обеспечивает предоставление результатов работы автоматизированной информационной системы мониторинга сложных инженерных сооружений, реализуя взаимодействие системы с пользователями (потребителями информации) посред-

ством тематического портала (веб-сайта), размещённого во внутрикorporативной сети или в сети интернет. Архитектура сервиса и технологии программирования выбраны исходя из принципа открытости программного обеспечения (исходных кодов) и стандартизации языков программирования, структур и протоколов хранения и передачи данных.

При построении сервиса требуется подготовка исходных данных об объекте мониторинга, для чего формируется карточка объекта, содержащая описание СИС и матрицу угроз, а также разрабатывается конечно-элементная модель конструкции СИС для выбора локальных параметров мониторинга и расчёта пороговых (предельных) значений выбранных параметров. Подготовленные данные записываются в хранилище в виде структур реляционной базы данных и используются для расчёта вероятности отказа элементов конструкции СИС по мере накопления информации от измерительного комплекса (датчиковой и преобразующей аппаратуры).

Применение в составе измерительного комплекса аппаратуры, использующей сигналы ГНСС, позволяет вести мониторинг смещений (перемещений и прогибов) и колебаний элементов конструкции СИС непрерывно в режиме реального времени независимо от метеорологических и времени суток.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 075-11-2019-015 от 22 октября 2019 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58519X0008.

Литература

1. Антонович К. М., Карник А. П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. № 6. С. 123–135.
2. Багаутдинова Е. Р., Еникеев Э. К., Кошманов В. Ф., Ревяков Г. А., Чистяков В. Ю. Система спутникового мониторинга смещений инженерных сооружений с использованием спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Патент РФ 2467298. Рег. 20.11.2012.
3. Большаков В. О., Жодзишский А. И., Нестеров О. В., Шитиков П. К. Экспериментальные исследования системы высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений, использующей технологию ГЛОНАСС/GPS // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 6. С. 44–49.
4. Жодзишский А. И., Большаков В. О., Нестеров О. В. Система высокоточного мониторинга смещений инженерных сооружений. Патент РФ 2496124. Рег. 20.10.2013.
5. Когаловский М. Р. Методы интеграции данных в информационных системах / Ин-т проблем рынка Российской акад. наук. 2010. 9 р.
6. Носкова А. И., Токранова М. В. Обзор автоматизированных систем мониторинга // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1(9). С. 42–47.
7. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2010. 384 с.
8. Сопегин Г. В., Сурсанов Д. Н. Использование автоматизированных систем мониторинга конструкций (АСМК) // Вестн. Московского гос. строит. ун-та. 2017. Т. 12. № 2(101). С. 230–242.
9. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ (в ред. Федерального закона от 2 июля 2013 г., № 185-ФЗ).
10. Ягер Р., Шпон П., Шайхутдинов Т., Горохова Т. И., Янкуш А. Ю. Математические модели и техническая реализация ГОСА — онлайн-системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 5. С. 9–32.
11. Gumus K., Selbesoglu M. O. Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system // Measurement. 2019. V. 142. P. 131–137. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119303598>.

Methods of development of information services for high precision monitoring of mechanical safety of components of complex engineering structures

A. I. Vasilev, M. M. Berezentsev, S. Yu. Kalinin

Russian Space Systems JSC, Moscow 111250, Russia

E-mail: csmou@spacecorp.ru

The paper refers to the research in the field of mechanical safety of construction structures with a particular regard to monitoring of displacements and deformations of components of complex engineering structures (CES), such as bridges and overpasses, dams, long span structures and high-rise buildings, installations for operation in the Arctic zone, in a shelf zone, and in spacecraft launching sites. Development of information services for high precision monitoring of CES displacements and deformations is based on the use of the service-oriented software architecture and data mining technologies including processing of large amounts of data and in-stream measurements in near real time. Operation of services is ensured by a measuring system, which may include both precision meters of physical parameters that are traditional for this area of study and meters supported by global positioning satellite systems. Besides, operation of services is supported by technologies of emergency simulation in virtual images of CES. The ultimate objective of development of such information services is to provide public agencies and business units involved in maintenance of CES life cycles with data required for assessment of mechanical safety of engineering structures.

Keywords: global positioning satellite system, monitoring of displacements and deformations of engineering structures, failure risk, information service

Accepted: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-83-91

References

1. Antonovich K. M., Karpik A. P., Monitoring ob'ektov s primeneniem GPS-tehnologii i drugih metodov opredeleniya polozheniya (Monitoring of the objects using GPS technologies and other methods of positioning), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2003, No. 6, pp. 123–135.
2. Bagautdinova E. R., Enikeev E. K., Koshmanov V. F., Revyakov G. A., Chistyakov V. Yu., *Sistema sputnikovogo monitoringa smeshchenii inzhenernykh sooruzhenii s ispol'zovaniem sputnikovykh navigatsionnykh sistem GLONASS/GPS* (System of satellite monitoring of engineering structures displacement with the use of GLONASS/GPS navigation systems), Patent RU 2467298, Reg. 20.11.2012.
3. Bol'shakov V. O., Zhodzishskii A. I., Nesterov O. V., Shitikov P. K., Eksperimental'nye issledovaniya sistemy vysokotochnogo monitoringa smeshchenii inzhenernykh sooruzhenii, ispol'zuyushchei tekhnologiyu GLONASS/GPS (Experimental studies of system for highly-precise monitoring of engineering structures displacement using GLONASS/GPS technology), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2011, No. 6, pp. 44–49.
4. Zhodzishskii A. I., Bol'shakov V. O., Nesterov O. V., *Sistema vysokotochnogo monitoringa smeshchenii inzhenernykh sooruzhenii* (System for highly-precise monitoring of engineering structures displacement), Patent RU 2496124, Reg. 20.10.2013.
5. Kogalovskii M. R., *Metody integratsii dannykh v informatsionnykh sistemakh* (Approaches for integrating data in the information systems), Institut problem rynka Rossiiskoi akademii nauk, 2010, 9 p.
6. Noskova A. I., Tokranova M. V., Obzor avtomatizirovannykh sistem monitoringa (A survey of computer-aided monitoring systems), *Intellektual'nye tekhnologii na transporte*, 2017, No. 1(9), pp. 42–47.
7. Raizer V. D., *Teoriya nadezhnosti sooruzhenii* (Theory of structure safety), Moscow: Izd. ASV, 2010, 384 p.
8. Sopegin G. V., Sursanov D. N., Ispol'zovanie avtomatizirovannykh sistem monitoringa konstruktсии (ASMK) (Applying of computer-aided systems of construction monitoring), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2017, Vol. 12, No. 2(101), pp. 230–242.
9. *Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii* (Technical regulation on the safety of buildings and structures), Federal Law No. 384-PhZ, Date 30.12.2009 (Rev. 02.07.2013).
10. Yager R., Shpon P., Shaikhutdinov T., Gorokhova T. I., Yankush A. Yu., Matematicheskie modeli i tekhnicheskaya realizatsiya GOCA — onlain-sistemy geodezicheskogo monitoringa i opoveshcheniya o defor-

- matsiyakh prirodnykh i tekhnogennykh ob"ektov, osnovannaya na tochnykh sputnikovykh (GNSS) i nazemnykh geodezicheskikh nablyudenyakh (LPS/LS) (Mathematic models and technical realization of online system for geodesic monitoring and warning about natural and man-made objects distortions based on precise satellite and ground geodesic observations), *Interekspo Geo-Sibir*, 2012, No. 5, pp. 9–32.
11. Gumus K., Selbesoglu M. O., Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system, *Measurement*, 2019, Vol. 142, pp. 131–137, available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119303598>.