TUNIS — СИСТЕМА ГЕОМОНИТОРИНГА VMT GMBH[1]

С. Шнеид (Sascha Schneid) — VMT GmbH, Германия

В 1991 г. получил среднее профессиональное образование в области геодезии. В 2000 г. окончил Университет прикладных наук Карлсруэ (Германия) и стал дипломированным инженером. В 2007 г. окончил университет Трента в г. Ноттингем (Великобритания) и получил ученую степень — доктор философии. Работал в компании Bersch Engeneering, г. Боппард (1991–1994), в компании Platter Engeneering, г. Лейпциг (1994–1996), в Университете прикладных наук Карлсруэ (2000–2006). С 2006 г. работает в компании VMT GmbH, в настоящее время — менеджер по системам геомониторинга.

Компания VMT GmbH, расположенная в г. Брухзаль (земля Баден-Вюртемберг, Германия), уже около 15 лет предлагает технические решения и программные средства для сбора и обработки данных измерений в области механизированного тоннелестроения.

Стремительное развитие современных информационных технологий непосредственно влияет на выбор компанией основных направлений, по которым ведутся собственные разработки. При этом в центре внимания, помимо зарекомендовавших себя навигационных систем для тоннелепроходческих машин, находятся информационные системы для хранения, подготовки и обработки данных, формируемые под условия конкретного проекта, и все более и более необходимые при наблюдении за состоянием отдельных технологических процессов и объектов в целом, причем, не только в сфере тоннелестроения.

С целью интеграции вышеперечисленных задач в настоящее время разрабатывается новая серия программно-аппаратных решений под общим названием Tunnel and Underground Integrated Software Structure (TUnIS).

В статье приводится описание применения одного из направлений TUnIS — системы геомониторинга. Данная система позволяет проводить автоматический мониторинг естественных и искусственных объектов. Задачей TUnIS является анализ с помощью надежных современных математических методов результатов измерений параметров объекта, поступающих с различных датчиков, установленных на нем. Цель этого практически полностью автоматизированного процесса — своевременное распознавание изменений состояния наблюдаемого объекта и незамедлительное информирование об этом пользователей.

Передача собранных результатов измерений осуществляется в пределах самоконтролирующейся и самокорректирующейся сети датчиков, являющихся важной частью системы TUnIS. До начала работ инженеры VMT устанавливают датчики и ведут их дальнейшее обслуживание в процессе мониторинга. Данные с датчиков поступают на центральный сервер, установленный либо на строительной площадке, либо размещенный в Интернет в виде web-сервера, обеспечивающего доступ всех участников проекта к данным для их обработки и/или просмотра.

Применение TUnIS для различных вариантов геомониторинга

Автоматический мониторинг, в том виде, в котором он выполняется с помощью системы TUnIS, включает различные методы систематического сбора и оценки данных измерений в заранее определенных точках наблюдаемого объекта. Объектом, как правило, выступает какое-либо инженерное сооружение. Кроме того, мониторинг предусматривает инициирование принятия мер в тех случаях, когда превышены заданные предельные значения в состоянии объекта.

Разработанная компанией VMT GmbH система геомониторинга может применяться для решения двух различных задач: наблюдения за состоянием объекта или создания модели объекта мониторинга.

Мониторинг с целью наблюдения. В этом случае задачей системы геомониторинга является непрерывное отслеживание состояния естественного либо искусственного объекта с целью предотвращения повреждений как непосредственно наблюдаемого, так и близлежащих к нему объектов. Опасные ситуации, которые могут возникнуть в связи с изменением состояния наблюдаемого объекта, должны быть своевременно распознаны и предотвращены.

Для этого в начале работы над проектом участниками совместно разрабатывается план аварийного оповещения. Важной частью данного плана является определение критических

* Статья подготовлена в рамках сотрудничества научных и производственных организаций России, Германии и Австрии (см. Геопрофи. — 2009. — № 6. — С. 19–21).

параметров и состояний объекта, а также мер и порядка их применения в случае возникновения определенной критической ситуации. Помимо этого, определяется круг лиц, ответственных за своевременность принятия мер в случае поступления аварийного сигнала.

Описанная выше система TUnIS может оказать существенную поддержку застройщикам и строительным компаниям, которым в ходе выполнения проекта требуется подтверждение соответствия проводимых строительно-монтажных работ и их безопасности для близлежащей инфраструктуры установленным нормативным требованиям.

Мониторинг с целью создания модели. Задачей системы геомониторинга в данном случае является поддержка пользователя при создании модели объекта мониторинга, позволяющей проводить исследования изменения параметров строящегося объекта (здания, моста, дамбы и проч.) при различных нагрузках.

При этом концепция системы TUnIS предусматривает формирование продолжительной по времени картины поведения объекта путем сбора и обработки данных, поступающих с установленных на нем датчиков. Это позволяет достичь высокой точности создаваемой модели.

Такая система предназначена для организаций, эксплуатирующих плотины, электростанции, а также уникальные инженерные сооружения, например, мосты и башни.

Система геомониторинга TUnIS в обоих вышеперечисленных случаях способна проводить мониторинг в автоматическом режиме до определенной степени. Идея, лежащая в основе интегрированной системы, позволяет создать «геомониторинговую цепочку» (рис. 1).

Рис. 1
«Геомониторинговая цепочка», реализуемая с помощью системы TUnIS

Геодезические и геотехнические средства измерений

Для наблюдения за объектом мониторинга инженеры VMT устанавливают геодезическое оборудование и/или геотехнические датчики в определенных точках, данные с которых собираются и анализируются с помощью специального программного обеспечения.

При этом геодезические приборы являются источниками геометрических параметров, с помощью которых проводится расчет трехмерных координат соответствующей точки в определенный момент измерения. Анализ получаемых таким образом динамических рядов измеренных величин позволяет определить деформации объекта. Под деформацией в данном случае подразумеваются любые геометрические изменения объекта: смещения, кручение, просадки, подъемы, растяжения, сжатия и изгибы.

Геодезические измерения охватывают, как правило, всю исследуемую площадь объекта и проводятся с заранее закрепленных пунктов, образующих сеть. Пространственное положение пунктов сети определяется по результатам уравнивания, для чего используются современные методы математической обработки, обеспечивающие необходимый контроль качества.

Для мониторинга применяются следующие геодезические приборы и оборудование: роботизированные тахеометры, приемники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и цифровые нивелиры.

Роботизированный тахеометр при правильном размещении способен автоматически измерять до 50 точек, расположенных на объекте мониторинга в радиусе до 100 м и более. На измеряемых точках устанавливают призмы с отражателями, не требующие электропитания и демонтируемые после завершения проекта. Роботизированный тахеометр используется, в основном, для наблюдения положения точек в плане и по высоте. Точность измерений при этом зависит от последовательности проведения измерений и технических характеристик тахеометра и составляет от 1 мм до 5 мм.

При мониторинге используют одно- или двухчастотные приемники ГНСС. Они позволяют получать точные пространственные координаты контрольных точек объекта, расположенных друг от друга на расстоянии от нескольких метров до 15 км и более. При этом необходимо отметить высокую частоту измерений — 20 Гц (20 измерений в секунду). Точность определения планового и высотного положения контролируемой точки зависит от выбранной технологии измерения и варьируется в пределах от 1–3 мм до 2 см.

Цифровой нивелир используется для измерения превышения между контрольными точками с точностью менее 1 мм. Расстояние между нивелиром и рейкой со штрих-кодом, устанавливаемой на точке, не должно превышать 30 м.

С помощью геотехнических датчиков измеряют либо дифференциальные (относительные) геометрические параметры отдельной точки объекта (дифференциальные просадки, сдвиги, изменения наклона, уровня, дли-

ны и т. д.), либо физические величины на участке, на котором они установлены (давление, температура, относительная влажность и др.). Наиболее часто при мониторинге используются следующие геотехнические датчики: электронный гидроуровень, инклинометрический зонд, стержневой экстензометр, анкерный датчик нагрузки.

Электронный гидроуровень (гидростатический нивелир) применяется для измерения взаимного высотного положения контрольных точек. В отличие от цифрового нивелира он может использоваться для измерения превышения между контрольными точками, расположенными друг от друга на значительных расстояниях. Кроме того, гидроуровень устанавливается, как правило, стационарно и на более длительный срок. В зависимости от типа гидроуровня точность измерения превышения варьируется от 0,1 мм до 0,6 мм.

Инклинометрический зонд устанавливается в вертикальной обсадной трубе и предназначен для измерения отклонения от вертикали оси трубы в пределах $\pm 30^0$. Точность измерения составляет 1 мм на 10 м.

Стержневой экстензометр позволяет определять относительные изменения расстояния между двумя точками — анкером и опорной головкой. Область измерений лежит в пределах от 20 мм до 250 мм, а точность отдельного измерения составляет 0,1 мм.

Анкерный датчик нагрузки используют для измерения силы давления на наблюдаемую точку объекта. Область измерений лежит в интервале от 1000 кН до 6000 кН. Точность измерения составляет 1%.

Размещение геодезического оборудования и геотехнических датчиков на объекте зависит от задач мониторинга и рассчитывается либо на основе исходных данных проекта, либо по согласованию с инженерами проекта и специалистами по геотехнике.

Перед реализацией проекта должна быть разработана его концепция, подтверждающая целесообразность выбора, надежность и точность средств измерений, а также включающая предложения по расположению датчиков, обеспечивающих достаточное и надежное определение деформаций исследуемого объекта. Положения концепции проверяются на соответствие требованиям стандартов DIN 4107 и DIN 18710[2].

Сбор данных геодезическим оборудованием и геотехническими датчиками проводится в полностью автоматическом режиме с помощью геоизмерительных сетей, являющихся следующей составляющей «геомониторинговой цепочки».

Геоизмерительные сети

Геоизмерительная сеть представляет собой структуру, состоящую из любого количества измерительных узлов — вычислительных блоков, обмен информацией между которыми происходит по кабельным либо по беспроводным сетям.

К каждому из измерительных узлов может быть подключено некоторое количество как геодезических приборов, так и геотехнических датчиков (рис. 2). При этом электропитание приборов и датчиков обеспечивается, как правило, с помощью того же кабеля, по которому с датчика на узел поступают данные измерений.

На специальном измерительном узле, так называемом центральном измерительном узле, устанавливается программное обеспечение для сбора поступающих данных. Центральный измерительный узел связывается с другими — пассивными узлами и выполняет таким образом сбор данных со всех установленных на объекте геодезических приборов и геотехнических датчиков, входящих в геоизмерительную сеть. Данные с датчиков считываются в соответствии с предварительно сконфигурированным временным графиком измерений, после чего информация передается на центральный компьютер сети с установленной SQL-базой данных. В качестве такого компьютера может использоваться как компьютер центрального измерительного узла, так и соответствующим образом оборудованный сервер, в зависимости от имеющейся инфраструктуры (наличие/отсутствие офисных помещений, контейнера и т. п.).

Помимо сбора и обработки данных с геодезических приборов и геотехнических датчиков, вышеописанное программное обеспечение выполняет функцию мониторинга состояния геоизмерительной сети. Возникшие при считывании или передаче данных сбои немедленно фиксируются, и далее система действует в соответствии с заранее определенным аварийным планом: например, передает информацию ответственному за ее состояние лицу.

Центральный измерительный узел дополнительно оборудуется компьютером с операционной системой Windows — во-первых, для предварительной обработки данных, а, во-вторых, для дистанционного обслуживания и управления геоизмерительной сетью. Предварительная обработка данных включает фильтрацию данных и устранение ошибок. Кроме того, в случае необходимости снижения объемов передаваемых по сети данных с датчиков, они могут быть сжаты. Дистанционное управление осу-

[2] Аббревиатура DIN служит для обозначения стандартов, разработанных Немецким институтом стандартизации. DIN 4107 устанавливает требования к наблюдениям за осадками возводимых и эксплуатируемых сооружений. DIN 18710 устанавливает требования к инженерно-геодезическим и инженерно-геологическим работам при строительстве сооружений.

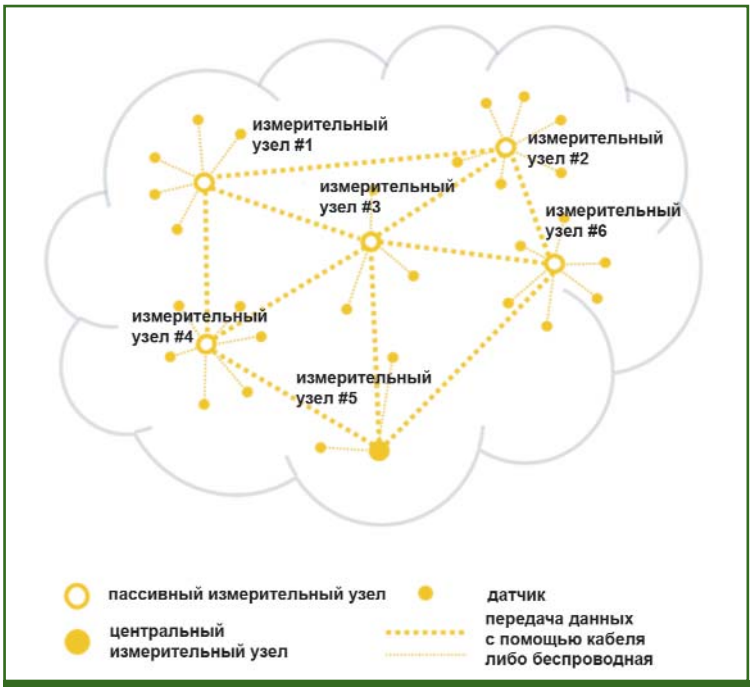

Рис. 2
Схема считывания и передачи данных измерений в рамках геоизмерительной сети

ществляется либо через интегрированный в измерительные узлы UMTS-модем, либо, при наличии DSL-подключения, через VPN-соединение, позволяющее выполнять обновление программного обеспечения, резервное копирование данных и др.

SQL-база данных может быть установлена на одном из защищенных web-серверов компании VMT GmbH. Геоизмерительная сеть оборудуется при этом соответствующими коммуникационными единицами, UMTS-модемами, DSL, WLAN и т. д. На центральном измерительном узле проводится настройка программного обеспечения, обеспечивающего непрерывную передачу данных измерений на web-сервер.

Сервер и SQL-база данных обслуживается в рамках проекта инженерами VMT. С помощью защищенного пароля обеспечивается Интернет-доступ участников проекта к просмотру данных, протоколам и результатам мониторинга.

Измерительные блоки, устанавливаемые в узлах геоизмерительной сети, изготавливаются компанией VMT GmbH в прочном корпусе, из высококачественной стали с классом защиты IP67, и рассчитаны на использование при плохих погодных условиях, а также в условиях повышенной запыленности и влажности. Конфигурация измерительного блока может быть различной (количество и тип подключаемых датчиков и др.) и разрабатывается инженерами VMT согласно условиям конкретного проекта.

Анализ данных

Функциональные возможности программных средств, используемых в системе геомониторинга TUnIS, определяются в соответствии с требованиями стандартов DIN 4107 и DIN 18710.

Для геомониторинга в системе TUnIS содержатся надежные алгоритмы для устранения грубых ошибок результатов измерений, а также стандартные методы обработки точечных и линейных измерений. Кроме того, современные методы анализа динамических рядов помогают пользователю в оценке и интерпретации результатов измерений.

Статистический контроль качества уравненных методом наименьших квадратов геодезических измерений проводится, как правило, с помощью регрессионного анализа. При этом устраняются грубые ошибки и определяются трехмерные координаты контрольных точек объекта и их надежность на определенный момент времени измерения. Для непрерывного анализа данных геодезических измерений в режиме реального времени, а также для расчета последовательной цепочки данных точек объекта компанией VMT GmbH используется система GOCA (автоматизированная контрольно-аварийная система наблюдений и анализа деформаций на базе ГНСС/LPS/LS — www.goca.info). Данная система разработана в Университете прикладных наук Карлсруэ (Германия). GOCA функционирует в полностью автоматическом режиме и использует современные научно-обоснованные математические методы. Координаты наблюдаемых контрольных точек, получаемые с помощью системы GOCA, вычисляются в системе координат опорных геодезических пунктов и сохраняются в базе данных с указанием точного времени проведения измерения. Определяемые таким образом динамические ряды создают основу для дальнейшего деформационного анализа и интерпретации, проводимых инженерами VMT, сопровождающими проект. Примером возможности системы может служить следующая последовательность действий в автоматическом режиме. Вычисляются смещения точки и полученные показатели проверяются на соответствие установленным в аварийном плане предельным значениям таких смещений. При превышении предельного значения смещения в системе TUnIS формируется и направляется соответствующее сообщение, в результате чего инициируется проведение заранее определенных в таких случаях мер.

Особенно стоит упомянуть модуль «Фильтр Калмана», с помощью которого может быть получена дополнительная информация, например, скорость перемещения и ускорение контрольной точки объекта. В ходе дальнейшей обработки на основе данной информации системой TUnIS рассчитываются тенденции и прогноз изменения положения этой точки.

В качестве дополнительного контроля качества с помощью специальных методов проводится наблюдение и подтверждается стабильность используемых при анализе опорных пунктов.

Система GOCA устанавливается на центральном сервере геоизмерительной сети и обслуживается в рамках проекта инженерами VMT. Вся полученная информация, динамические ряды координат пунктов объекта, а также результаты контроля качества, передаются в SQL-базу данных для дальнейшей обработки. Эта процедура совместно с аварийной системой является последней составляющей «геомониторинговой цепочки».

Отчеты и аварийная система

В системе геомониторинга TUnIS составление отчетов и выбор команд для аварийного предупреждения может выполняться автоматически и полуавтоматически.

К началу проекта инженерами VMT при тесном сотрудничестве с заказчиком и, возможно, другими участниками проекта, разрабатывается план составления отчетов/протоколов и аварийный план. В плане составления отчетов определяются конкретные характеристики отчетов, автоматически создаваемых системой при выполнении проекта. При этом один отчет может содержать несколько таблиц и диаграмм. Кроме того, устанавливается круг лиц, которым определенные отчеты должны направляться по электронной почте с заданной периодичностью (день и часы отправки). В данном плане, в случае необходимости, оговариваются условия предоставления результатов мониторинга на определенной странице в Интернет, защищенной паролем.

Автоматически создаваемые таблицы и диаграммы отчета могут отображать любые данные, поступившие в SQL-базу данных, например, непрерывно рассчитываемые смещения и просадка точки объекта.

В аварийном плане определяется круг лиц, оповещаемых в случае возникновения критической ситуации, характеристики которой, в свою очередь, также устанавливаются в рамках этого плана. Примером критической ситуации может быть превышение максимально допустимых показателей смещения или просадки контрольной точки объекта. Для этого допустимые значения заносятся в SQL-базу данных и используются в процессе работы системы для сравнения с поступающими данными измерений. При обнаружении системой превышения заданных значений инициируются предусмотренные аварийным планом меры: например, уведомление путем отправки SMS-сообщения или сообщения по электронной почте, включение сирены и/или световой сигнализации. В качестве критической ситуации в аварийном плане может быть также определена поломка датчика или измерительного узла.

Для проектов, в которых превышение определенных критических значений влечет за собой создание особо опасной ситуации, предусмотрена опция отправки уведомлений, требующих подтверждения их получения, например, телефонным звонком или нажатием определенной клавиши. При этом, если сообщение о возникновении критической ситуации не подтверждается в течение заданного времени, системой предпринимаются дальнейшие шаги, такие как уведомление других лиц, включение аварийного сигнала и т. п.

Здесь стоит упомянуть, что для успеха проекта крайне важно, чтобы в аварийном плане были прописаны действия ответственных лиц при возникновении конкретной аварийной ситуации.

Все отчеты и аварийные оповещения, рассылаемые системой геомониторинга TUnIS в течение действия проекта, дополнительно сохраняются в базе данных, обеспечивая, таким образом, непрерывное и полное документирование всех событий.

Кроме вышеуказанных, полностью автоматических функций по созданию отчетов и аварийному оповещению, в системе геомониторинга TUnIS предусмотрены различные программные решения для создания диаграмм, ведения статистики и проведения непредусмотренных стандартным списком оценок и интерпретаций полученных результатов.

Система геомониторинга TUnIS, предлагаемая компанией VMT GmbH, является комплексным современным решением задач геодезического и геотехнического наблюдения. Ее конфигурация определяется и настраивается инженерами VMT с учетом особенностей конкретного проекта.

По специальным вопросам анализа данных и разработке соответствующих программных инструментов фирма VMT GmbH сотрудничает с Университетом прикладных наук Карлсруэ.

RESUME

One of directions of application of the integrated hardware-software complex for gathering and data processing of measurements in the field of mechanized tunneling (TUnIS) — geomonitoring is described. At the heart of TUnIS reliable modern mathematical methods of the analysis of results of measurements of parameters of the investigated object arriving from various gauges are put. It allows to automate almost completely process of recognition of changes of a condition of observable object and immediately to inform on it the user.