

ПРИМЕНЕНИЕ WEB-СЕРВИСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИЙ И ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

Русанов В. Е.,

к. т. н., доцент, зам. ген. директора по науке
ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

Пичугин А. А.,

к. т. н., нач. отд. защиты от шума
и вибрации ООО «НИЦ Тоннельной
ассоциации»

Медведев Г. М.,

зав. лаб. диагностики и мониторинга
сооружений ООО «НИЦ Тоннельной
ассоциации»

Мильчевский П. С.,

инженер ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

Тарасов Ю. А.,

инженер ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

Максимов Д. В.,

инженер ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

Мельник Г. В.,

нач. отд. научных исследований
и экспериментального проектирования
АО «Гипроречтранс»

Некрасов И. А.,

генеральный директор
ООО «Алгоритм-Акустика»

Аннотация. На примере проходки тоннелей метрополитена под конструкциями Карамышевского шлюза Канала им. Москвы показано применение web-сервисов для автоматизированного мониторинга вибраций и осадок конструкций шлюза. Обоснован выбор систем мониторинга, и изложены результаты работ. Предлагаются направления дальнейшего развития и применения систем автоматизированного мониторинга вибраций и осадок с использованием web-сервисов для контроля состояния гидросооружений.

Ключевые слова: web-сервис, автоматический мониторинг, вибрации, высотное положение, осадки, шлюз, тоннель, метрополитен, проходка, гидросооружения.

Введение

При строительстве Большой кольцевой линии Московского метрополитена на участке между станциями метро «Улица Народного ополчения» и «Нижние Мневники» возникла необходимость проходки двух перегонных тоннелей диаметром 6 м на глубине около 12 м под конструкциями шлюза № 9 Канала им. Москвы (рис. 1). Шлюз расположен на спрямлении Карамышевской излучины р. Москвы, введен в эксплуатацию в 1937 г. Над шлюзом проходит железобетонный Мневниковский мост и возводится Новый Карамышевский мост.

Конструкция шлюза типовая, включает 13 монолитных железобетонных секций длиной 20–27 м, с размерами поперечного сечения 30×15,25 м, толщина стен секций

1–5 м, толщина днища — 4 м. Возможность проходки тоннелей под шлюзом без повреждения его конструкций вызвала сомнения. По результатам обследования, выполненного АО «Триада-Холдинг» в 2017 г., были выявлены многочисленные дефекты, сформировавшиеся в процессе эксплуатации, бетон на ряде участков обладал пониженной прочностью. Согласно декларации безопасности 2016 г., а также результатам дополнительных натурных исследований, техническое состояние шлюза № 9 оценивалось как ограниченно работоспособное, а уровень его безопасности как пониженный.

В ходе подготовительных работ силами АО «Гипроречтранс» и ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» был выполнен прогноз влияния проходки тоннелей метрополитена под шлюзом

ON WEB-BASED SERVICES FOR AUTOMATED MONITORING OF VIBRATIONS AND ELEVATIONS OF SHIPPING LOCK STRUCTURES
V. Rusanov, A. Pichugin, G. Medvedev, P. Milchevsky, Yu. Tarasov, D. Maksimov, Engineering Research Centre of Tunnel Association OOO
G. Melnik, Giprorrechtrans JSC
I. Nekrasov, Algorithm-Acoustics OOO

Abstract. The article presents the use of web-based services for automatic monitoring of vibrations and setting of lock structures based on the Metro tunneling experience under the structures of the Karamyshevsky lock of the Moscow Canal. The authors substantiated the choice of monitoring systems, presented the monitoring results and proposed directions of further development and application of vibrations and setting automatic monitoring by using web-based service to control the condition of hydraulic structures.

Keywords: web-based service, automatic monitoring, vibration, elevations, settlement, lock, tunnel, subway, tunneling, hydraulic engineering structures.



Рис. 1. План расположения объектов (сервис Яндекс.Карты)

на его конструкции. Для контроля состояния конструкций шлюза было принято решение об использовании во время проходки тоннелей метрополитена систем автоматического мониторинга вибраций и высотного положения (осадок).

Применение систем автоматического мониторинга позволяет в режиме реального времени, круглосуточно, без влияния человеческого фактора вести контроль параметров состояния конструкций. Важнейшим фактором при выборе системы мониторинга являлось наличие в ней web-сервиса с возможностями отражения хода мониторинга в Интернете, хранения информации, автоматического оповещения о событиях превышения установленных предельных величин параметров колебаний и деформаций, удаленного управления приборами.

Автоматизированный мониторинг проводился силами ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» в соответствии с разработанной вместе с АО «Гипроречтранс» программой мониторинга в течение всего периода проходческих работ в технической зоне шлюза. Проходка перегонных тоннелей в технической зоне шлюза выполнялась в период с начала декабря 2018 г. до конца февраля 2019 г. Мониторинг вибраций осуществлялся в период с 18.01.2018 по 11.04.2019 и, дополнительно, до 19.07.2019, мониторинг осадок проводился с 21.11.2018 по 11.04.2019.

Для мониторинга были использованы:

- система автоматизированного мониторинга вибраций на базе четырехканальных станций SV 258 PRO (производитель SVANTEK Sp.zo.o., Польша, поставщик ООО «Алгоритм-Акустика»);
- система автоматизированного мониторинга высотного положения «Монитрон ДГН-2» на базе датчиков гидростатического нивелирования ДГН-2 (производитель ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»).

Web-сервисы

Система автоматизированного мониторинга вибраций основывается на сервере SvanNet (разработчик SVANTEK). Сервер обеспечивает подключение к станциям мониторинга, где бы ни находился оператор и с любого устройства: персонального компьютера, мобильного телефона или планшета. С целью дистанционного управления и передачи и получения данных, станции мониторинга оснащены 3G-модемом для подключения к Интернету через стандартную сотовую связь и контроллером, управляющим всеми режимами работы.

Для доступа к серверу достаточно открыть в браузере начальную страницу svannet.com и пройти авторизацию, используя индивидуальный логин и пароль. Сервис позволяет хранить в облаке, редактировать, просматривать и скачивать данные

виброизмерений, управлять настройками станций, обрабатывать результаты измерений, готовить данные для отчетов, предоставлять доступ к данным измерений третьим лицам, в том числе свободный доступ в Интернете и т.п. На сервере можно определить нормативные документы, в соответствии с которыми будет вестись мониторинг (причем доступны для применения нормы множества стран), либо установить собственные требования к параметрам колебаний. Станции мониторинга постоянно передают на сервер телеметрию о состоянии оборудования, электропитании, качестве связи и т.п.

Отдельные станции могут объединяться в группы — «проекты», для которых возможно одновременное отражение результатов измерений, их обработка, настройка приборов, распределение доступа и т.п. Обычно каждый проект соответствует отдельному объекту мониторинга.

Через сервер имеется возможность назначать предельные величины параметров состояния конструкций, превышение которых вызывает автоматическую рассылку сообщений о превышении, и определять адреса рассылки.

Система автоматизированного мониторинга высотного положения основывается на сервере Monitron (специализированная разработка ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»). Сервис имеет схожий со SvanNET функционал, за исключением опции настройки приборов. Начальная страница сервиса monitron.xuz. Важной особенностью web-сервиса Monitron является возможность подключения к нему любой контрольно-измерительной аппаратуры. Связь системы контроля осадок «Монитрон-ДГН-2» с web-сервисом осуществляется через контроллер и вспомогательный компьютер на объекте с выходом в Интернет.

Мониторинг вибраций

Реализация автоматизированного мониторинга вибраций при проходке тоннелей метрополитена под



Рис. 2. Станция автоматического мониторинга вибраций SV 258 PRO

шлюзом обеспечила непрерывный оперативный контроль состояния сооружения в условиях, когда другие более распространенные методы, основанные на результатах обследований, были чрезвычайно затруднены в силу особенностей конструкций шлюза.

Для выполнения вибромониторинга использовались две автономные автоматические станции мониторинга вибраций SV 258 PRO. Основным фактором, повлиявшим на выбор оборудования, стала возможность наблюдения за ходом мониторинга и управления процессом через Интернет, причем часть информации о ходе мониторинга находилась в открытом доступе. Общий вид станции мониторинга показан на рис. 2.

Основные особенности станции:

- наличие 3G-модема, позволяющего обеспечить постоянную связь со станцией;
- дистанционное управление и получение результатов измерений;
- «облачное» хранение результатов измерений;
- наличие специализированного программного обеспечения;
- возможность работы в полевых условиях (защита IP65, $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- множество способов обеспечения электропитания прибора (сеть 220 В, штатная батарея, дополнительные внешние батареи, солнечные батареи);
- длительный срок автономной работы (110–170 ч);
- защищенный акселерометр, не требующий дополнительной защиты.

В ходе мониторинга вибраций контролировались виброскорости

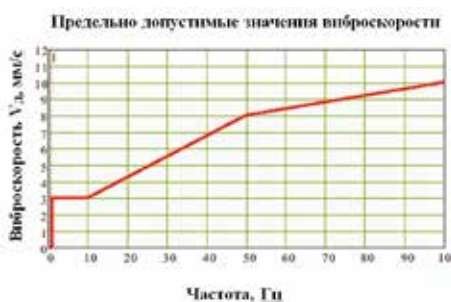


Рис. 3. Предельно допустимые значения виброскорости V_d в зависимости от частоты колебаний

конструкций шлюза (в контрольных точках, для трех координатных осей). Скорости колебаний регистрировались с помощью трехкомпонентного акселерометра.

Важной задачей при разработке программы мониторинга было определение допустимых значений виброскорости, которые, после рассмотрения множества вариантов, были выбраны на основе требований ГОСТ Р 52892–2007 [1]. Предельные значения виброскорости, согласно ГОСТ Р 52892–2007 (рис. 3), соответствуют предельным значениям, установленным DIN4150–3:1999 [2].

Мониторинг вибраций производился в двух точках по берегам шлюза. Были организованы две станции вибромониторинга — «Северная», предназначенная для северного (левого) берега шлюза, и «Южная», предназначенная для южного (правого) берега сооружения, которые вели непрерывный мониторинг в период проходки перегонных тоннелей метрополитена под шлюзом. План расположения станций вибромониторинга приведен на рис. 4.

Станции автоматического мониторинга вибраций хорошо показали себя во время работы и не прекращали измерения как в мороз при температуре ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и в дожди, и во время временных отключений электропитания.

Пример хода мониторинга с 8:50 до 9:45 08.02.2019 во время проходки щита непосредственно под шлюзом по его оси показан на рис. 5. В таком виде процесс мониторинга отображался в открытом досту-

пе в Интернете. Желтым цветом на графиках отмечены показания для Северной станции, синим цветом — для Южной. Графики виброскорости на web-сервисе представлены в интерактивной форме, что позволяет контролировать изменение виброскорости в точке мониторинга в зависимости от времени и определять ее значения. В случае превышения установленных предельных величин виброскорости пользователям по установленному списку автоматически направлялись смс и электронные письма с оповещениями, значениями виброскорости, и в том числе ссылкой для доступа к дополнительной информации на сервере.

За период вибромониторинга при проходке тоннелей зафиксирован один случай превышения предельных значений виброскорости. В этот момент, на основании полученных данных, проходка была приостановлена, после чего были выработаны рекомендации и внесены изменения в режим работы проходческого щита, приведшие к снижению вибраций конструкций шлюза до допустимого уровня. После корректировки режима работы щита проходка в дальнейшем проходила в штатном режиме.

Вибромониторинг принес исключительно большой массив информации о колебаниях конструкций шлюза. С помощью прилагаемого специализированного программного обеспечения предоставляется возможность получать спектры колебаний, разнообразные выборки и статистику. Рассмотрим несколько примеров.

Благодаря непрерывному круглосуточному мониторингу были выявлены редкие, малоизученные и довольно значительные (порядка миллиметров в секунду) низкочастотные колебания, вероятно, днища шлюза. Частота колебаний при этом менее 1 Гц, т.е. вне контролируемого интервала частот, определяемого [1] (рис. 3).

На рис. 6 отчетливо видны всплески колебаний при швартовке во время шлюзования. Весьма интересен рис. 7, на котором

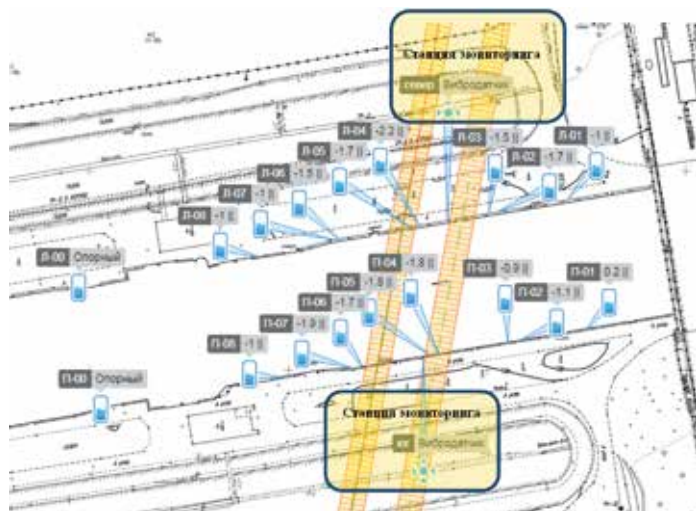


Рис. 4. План расположения станций вибромониторинга и датчиков системы «Мониторон ДГН-2» (обозначения при нумерации датчиков: Л — левый берег, П — правый берег)

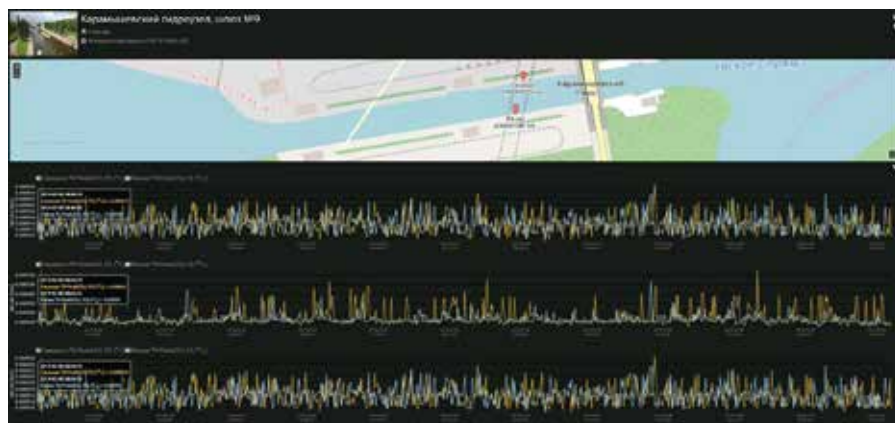


Рис. 5. Ход вибромониторинга в режиме реального времени

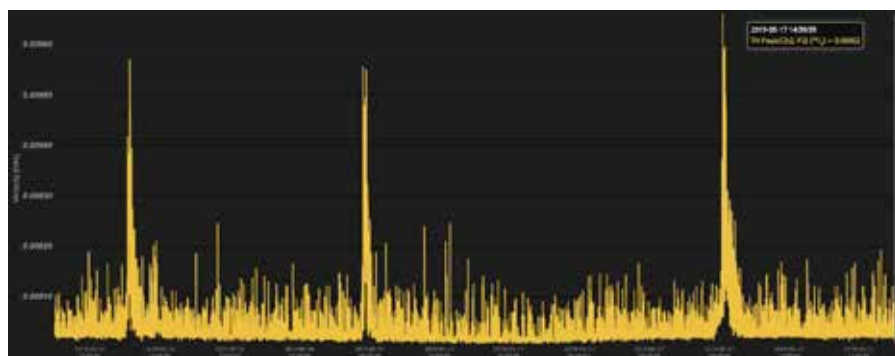


Рис. 6. Пример повышенных вибраций во время шлюзования. Северная станция. Виброскорость по оси Y (поперек шлюза, 15:00 16.05.2019–15:00 17.05.2019). Максимальное значение виброскорости $V_{Ymax} = 0,662$ мм/с

показано распределение частот и максимальных значений виброскорости при колебаниях стенки шлюза, где серии колебаний на одной частоте (столбики частот) с высокой степенью вероятности являются частотами собственных колебаний.

Мониторинг высотного положения

С целью определения высотного положения конструкций шлюза на правой и левой стороне сооружения были смонтированы два комплекта системы «Мониторон ДГН-2» (рис. 4, рис. 8). Предельно допустимые

уровни осадок принимались, согласно СП 22.13330.2016 [3], равными 20 мм.

Комплекты «Мониторон ДГН-2» включали в себя (рис. 4, рис. 9):

- по девять датчиков гидростатического нивелирования (ДГН), в том числе опорный ДГН, вынесенный за пределы предполагаемой зоны осадок от проходческих работ;
- многоканальное регистрирующее устройство (контроллер);
- соединительные ПВХ трубки для объединения ДГН в замкнутую систему, кабели и крепежные приспособления;
- портативный компьютер с установленным специальным программным обеспечением и беспроводным выходом в Интернет.

Основой системы мониторинга является группа гидравлических уровней. При монтаже системы мониторинга формируется замкнутая система металлических сосудов, наполненных специальной жидкостью, соединенных между собой ПВХ трубками. ДГН устанавливаются на каждый сосуд в верхней части. Питание ДГН осуществляется по кабелям за счет подключения к регистрирующему устройству. Показания ДГН передаются по кабелям на регистрирующее устройство и далее на компьютер, где сигналы обрабатываются специальной программой.

В результате обработки информации на компьютере формируется значение высотного перемещения — подъема или осадки. ДГН фиксирует изменение высотного положения с точностью $\pm 0,5$ мм за счет измерения расстояния от датчика до поверхности жидкости в сосуде (для измерения расстояния применяется лазер).

Основные характеристики системы «Мониторон ДГН-2», использованной на шлюзе, приведены в табл. 1. Мониторинг высотного положения конструкций шлюза осуществлялся в автоматическом режиме. Пример графика вертикальных перемещений для датчика «П-06» (П — правый берег) по состоянию на момент выхода ТПМК за техническую зону шлюза 20.12.2018 при

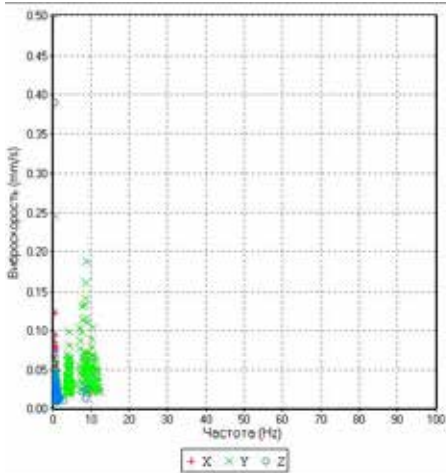


Рис. 7. Серии частот колебаний конструкций шлюза. Направление колебаний: X—вдоль шлюза; Y—поперек; Z—вертикальные

проходке левого путевого тоннеля приведен на **рис. 10**.

Предварительные расчеты, выполненные при проектировании, определили для сооружений шлюза при проходке двух перегонных тоннелей ТПМК расчетную зону влияния в 23 м (в каждую сторону от внешних граней стен секций). Максимальные расчетные осадки конструкций секций шлюза (в зависимости от рассматриваемой секции) составили 2,6–4,9 мм, что не превышает предельно допустимых значений 20 мм [3].

Из данных мониторинга следует, что результаты измерений осадок шлюза имеют высокую сходимость с результатами расчетов, выполненных на стадии проектирования, при этом измеренные значения осадок не превышают (причем с многократным запасом) предельных значений, установленных [3].

Мониторинг показал стабилизацию осадок по завершении работ по проходке тоннелей.

Выводы по результатам автоматизированного мониторинга

По результатам автоматизированного мониторинга вибраций и высотного положения конструкций Карамышевского шлюза можно сделать следующие основные выводы:

1. Мониторинг вибраций обеспечил непрерывный контроль динамических воздействий на шлюз при проходке тоннелей метрополитена.



Рис. 8. Датчики гидростатического нивелирования системы «Монитор ДГН-2», установленные на правом берегу шлюза

2. Определены собственные частоты колебаний шлюза.

3. Отмечена стабильность частот колебаний, жесткость конструкций шлюза не изменилась в ходе проходки тоннелей метрополитена.

4. Выявлены малоизученные, значительные низкочастотные ко-

лебания, вероятно днища шлюза, с частотой менее 1 Гц, т.е. вне контролируемого интервала частот, определяемого [1] (**рис. 3**), редкие колебания такого рода удалось обнаружить только благодаря непрерывному круглосуточному мониторингу.

Табл. 1. Характеристики системы «Монитор ДГН-2»

Диапазон измерений	0–100 мм
Точность (СКП)	±0,5 мм
Количество датчиков в одной системе	9 шт.
Время одного цикла измерений	4 мин.
Температурный диапазон измерений для системы сосудов	–30...+30 °С
Температурный диапазон измерений для регистратора	+5...+30 °С

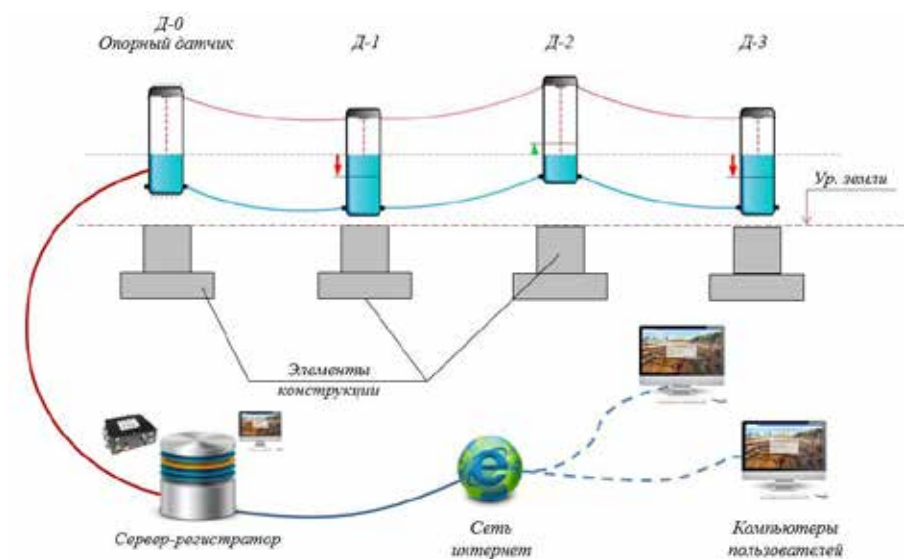


Рис. 9. Принципиальная схема работы системы

5. Выявлена разница в колебаниях стенок секций шлюза, не зависящая от времени суток и дня недели, при этом, вибрации Северной стенки шлюза (левый берег) превосходят вибрации Южной стенки (правый берег), что указывает на различия в состоянии конструкций и грунтов.

6. Система вибромониторинга показала свою эффективность при контроле динамических воздействий на конструкции шлюза от ТПМК при проходке и позволила скорректировать режим проходки при превышении предельно допустимых параметров колебаний.

7. Полученные результаты мониторинга осадок на шлюзе имеют высокую сходимость с результатами расчетов, выполненных на стадии проектирования, и не превышают предельных значений установленных [3].

8. В ходе наблюдений после окончания проходческих работ в технической зоне шлюза наблюдается тенденция к стабилизации осадок конструкций.

9. Во время автоматического мониторинга впервые получен беспрецедентный, большой по объему и непрерывный во времени массив информации о колебаниях и осадках подобного гидротехнического сооружения в разное время года при различных температурных и гидрологических условиях.

10. Автоматизированный мониторинг вибраций и высотного положения конструкций в период выполнения проходческих работ в технической зоне шлюза способствовал обеспечению безопасности ведения строительства и сохранности конструкций шлюза.

В целом, системы автоматизированного мониторинга вибраций и высотного положения конструкций Карамышевского шлюза с использованием web-сервисов (SvanNet и Monitor) обеспечили качественный скачок в объеме, форме, доступности, непрерывности и устойчивости мониторинга, показали эффективность их применения на гидротехнических объектах и возможность долговременной устойчивой работы в условиях низких температур.

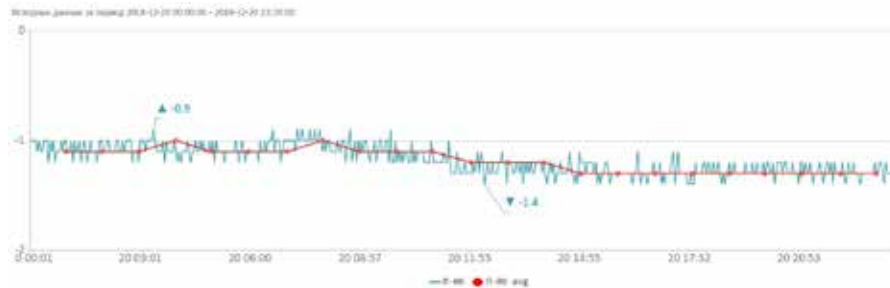


Рис. 10. Пример графика вертикальных перемещений (мм)

Направления дальнейшего развития и применения систем автоматизированного мониторинга вибраций и осадок с использованием web-сервисов

Подобные автоматические системы мониторинга могут найти широкое применение при составлении динамических паспортов гидросооружений.

Например, в гидроэнергетике существует типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций, разработанный в соответствии с требованиями «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей» [4]. Паспорт является приложением к техническому паспорту гидротехнических сооружений электростанций, и в нем отражаются динамические характеристики сооружений.

Динамический паспорт гидротехнических сооружений предусмотрен в ряде случаев СП 58.13330.2012. «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003» [5].

Можно предположить, что наступает время применения динамических паспортов гидросооружений повсеместно, в том числе там, где они до настоящего времени не применяются, например, для судоходных гидросооружений.

Сочетание автоматического мониторинга одновременно вибраций и осадок позволит создать целостную модель статике и динамики гидротехнического сооружения на основании единственных доступных интегральных показателей его состояния — динамических параметров (частоты собственных колебаний, формы собственных колебаний, де-

кременты колебаний) и статического параметра (деформации).

Следует отметить, что результаты автоматизированного мониторинга вибраций и осадок могут быть легко внедрены как объективные инженерные критерии в развиваемые в настоящее время федеральные программы контроля безопасности гидросооружений.

Доступность web-сервисов через Интернет даже позволяет непосредственно и непрерывно отправлять данные мониторинга и уведомления как в сети контролирующих органов, например Федерального агентства морского и речного транспорта, так и отдельным сотрудникам органов контроля.

Литература

1. ГОСТ Р 52892–2007 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию.
2. DIN4150–3:1999. Structural Vibration— Effects Of Vibration On Structures, FRG.
3. СП 22.13330.2016 Основания и фундаменты.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Минэнерго РФ, 2003.
5. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33–01–2003.



Общество с ограниченной ответственностью «Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации» (ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации») 129344 г. Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, комн. 10
Тел. +7(495)788-80-61
E-mail: nizta@inbox.ru