

УДК 624.21.016

Интегральный мониторинг моста Александра Невского

Авторы:

Белый Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент ФГКВУО ВО ВАМТО;

Белов Александр Алексеевич, заместитель генерального директора АО НПП «Промтрансавтоматика»;

Яценко Андрей Иванович, заместитель генерального директора ООО «Фирма Г.Ф.К.»;

Антонюк Анатолий Анатольевич, инженер кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС.

Описывается разработанная и смонтированная коллективом авторов система мониторинга моста Александра Невского через Неву в Санкт-Петербурге. Данная система была внедрена как первый этап реализации Концепции мониторинга искусственных дорожных сооружений Санкт-Петербурга с применением автоматизированных технологий. Сформулировано понятие «интегральный» мониторинг, включающее в себя несколько разных подсистем с отличающимися физическими базисами, а также основывающееся на приоритетах и алгоритмах, заложенных в программное обеспечение, позволяющих избежать ошибочных срабатываний системы.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений; объект транспортной инфраструктуры; управление техническим состоянием; напряженно-деформированное состояние; надежность.

A monitoring system for the Alexander Nevsky Bridge across the Neva in St. Petersburg developed and installed by the authors is described. This system was introduced as the first stage of implementation of the Concept of monitoring of artificial road structures of St. Petersburg using automated technologies. The concept of «integral» monitoring is formulated, which includes several different subsystems with different physical backgrounds, as well as based on priorities and algorithms embedded in the software that allow you to avoid erroneous system indications.

Keywords: structural health monitoring; transport infrastructure object; management of technical condition; stressed-deformed condition; reliability.

Введение

В настоящее время системы мониторинга являются наиболее адекватным и точным инструментом по диагностике объектов гражданского и транспортного строительства как во время их возведения, так и особенно в период последующей эксплуатации [1, 2, 3, 5, 7, 8, 14, 15]. Эта тенденция наблюдается параллельно с новыми современными подходами глобального информационного моделирования и обследования искусственных сооружений [9]. Различными примерами применения систем мониторинга являются транспортные

объекты: мосты [6, 7, 10, 11, 12], тоннели [13, 16], набережные, дамбы [17] и гидротехнические сооружения, а также отдельные элементы объектов транспортной инфраструктуры [18, 19, 20], но основной сферой применения систем мониторинга являются мостовые конструкции [4, 6, 7, 10, 11, 12, 21, 22]. По всей видимости это связано со сложными условиями их эксплуатации, что, впоследствии, напрямую влияет на степень сложности работ по их ремонту и содержанию: зачастую мостовые сооружения расположены через большие реки, заливы, искусственные преграды.

В 2017-2018 г.г. авторами по заказу старейшей в стране эксплуатирующей организации в области искусственных сооружений – СПб ГБУ «Мостотрест» – была создана «Концепция мониторинга искусственных дорожных сооружений Санкт-Петербурга с применением автоматизированных технологий с последующей разработкой на её основе рабочей документации на систему автоматизированного мониторинга моста Александра Невского» (далее – Концепция мониторинга). Подробности данной работы неоднократно излагались авторами, например в работах [23, 24]. Не оста-

навливаясь подробно, отметим, что мост Александра Невского послужил первым объектом, направленным на реализацию положений Концепции мониторинга, а всего в этой Концепции порядка 100 городских объектов. Причиной, по которой в качестве первоочередного сооружения был выбран именно мост Александра Невского (а равно объясняющий актуальность настоящей статьи), послужил тот факт, что данный объект является уникальным в своем роде, технические особенности которого, и проблемы, встававшие перед строителями и специалистами по эксплуатации за более чем 50-летний срок службы объекта, хорошо известны представителям отрасли и научному сообществу. Армирование проволочными канатами, расположенными внутри коробчатых балок пролетных строений, натянутых изначально на 80-100 т, а затем П-образные хомуты усиления – это нетиповые элементы, редко применяемые в практике мостостроения даже в наши дни, не говоря о предшествующих периодах. Канаты неоднократно обрывались, пролетные строения провисали, объект реконструировался, и именно на нем при реконструкции 2000-2001 г.г. впервые в России была применена система мониторинга мостовых сооружений [25].

К моменту подготовки Концепции мониторинга система 2000 г. морально и физически устарела. Прогресс в области аппаратных и программных средств мониторинга за последние 20 лет предопределил необходимость создания качественно нового продукта, позволяющего достоверно и быстро оценить состояние наиболее ответственных узлов и конструкций сооружения, что и является основной целью исследования, проводимого авторами в рамках реали-

зации Концепции мониторинга и написания настоящей статьи.

Для этого авторами были сформулированы и решены следующие задачи:

- анализ технического состояния моста Александра Невского и выбор точек и зон контроля;
- анализ недостатков предыдущей системы мониторинга;
- выбор подсистем мониторинга, с кратким изложением их физической сути работы, для интегральной оценки технического состояния;
- предварительный анализ работоспособности системы мониторинга.

Объект исследования и применяемые параметры мониторинга

Мост Александра Невского через р. Неву был построен в 1960-1965 годах. Мост представляет собой семи пролетное железобетонное сооружение с разводным пролетом посередине и пандусами на обоих берегах. Постоянные пролеты перекрыты 3-х пролетными неразрезными балками с жесткой заделкой на промежуточной опоре (49.9+109.8+123.5 м).

Жесткое объединение опоры с пролетным строением является особенностью моста, которая обуславливает необходимость тщательного наблюдения за поведением моста в процессе эксплуатации.

В поперечном сечении постоянное пролетное строение составлено из двух широко расставленных главных балок, пространство между которыми перекрыто системой поперечных и продольных балок. Главные балки имеют криволинейное очертание нижнего пояса и трехстенчатое коробчатое сечение. Они выполнены из преднапряженного железобетона. Поперечные балки двутаврового сечения из обычного железобетона.

Главные балки имеют комбинированное внутреннее армирование, включающее:

- напрягаемую стержневую арматуру;
- семипрядевые проволочные пучки из 49 параллельных проволочек диаметром 5 мм с временным сопротивлением 17000 кг/см², обетонированные по всей длине и имеющие сцепление с основными конструкциями;
- закрытые стальные канаты $d=47$ мм с разрывным усилием 180 тс и открытые стальные канаты $d=45$ мм с разрывным усилием 170 тс. Часть стальных канатов-шпренгелей жестко соединена на части длины с главными балками, другая часть шпренгелей свободна по длине и допускает регулирование усилий предварительного обжатия в процессе эксплуатации моста. Еще при производстве строительно-монтажных работ, начиная с 1964 года, происходили обрывы канатов открытого типа диаметром 45 мм по механизму хрупкого разрушения коррозионным растрескиванием (ХРКР). Вследствие этого усилия натяжения канатов были понижены до 75 тс от номинальной величины 100 тс. В дальнейшем в процессе эксплуатации моста, несмотря на принятие ряда превентивных мер, происходили неоднократные обрывы канатов (в 1967, 1968, 1980 г.г.).

Ввиду этого, а также по причине все возрастающей транспортной нагрузки, к рубежу тысячелетий было принято решение о проведении полноценной реконструкции моста.

В результате этих работ коробчатые балки моста были усилены снаружи и изнутри. Использовалась напрягаемая арматура на внешней (наружной) стороне нижних плит коробчатых главных балок. Такая арматура представляла собой



Рисунок 1. Усиление главных балок стационарных пролетных строений. Датчики напряжения на канатах усиления.

пучки канатов заводского изготовления типа К7 диаметром 15 мм (рисунок 1). Пучки располагаются в металлических коробках, прикрепленных к нижней поверхности нижней плиты с помощью анкеров производства Hilti.

Имевшиеся на поверхности главных балок трещины предварительно заделывались специальным раствором, после чего выполнялись работы по усилению, включая натяжение арматурных пучков. Внутри главных балок устанавливались дополнительные канаты фирмы THYSSSEN с натяжением на 20% от полного нормативного усилия на случай обрыва уже включенных в работу конструкции арматурных пучков.

Для восприятия главных растягивающих напряжений были использованы предварительно напряженные П-образные хомуты из семи проволочных витых канатов по системе Freyssinet (рисунок 2). Концы хомутов заделывались в нижнюю плиту внутри коробчатых балок. Вверху имелись специальные отклоняющие устройства, обеспечивавшие перегиб хомутов и одновременное усиление одной ветвью хомута двух внутренних стенок.

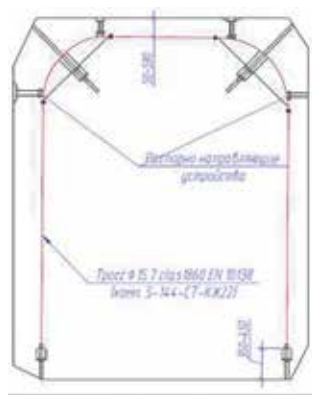


Рисунок 2. Предварительно напряженные хомуты Freyssinet

Были осуществлены и другие работы по полному переустройству некоторых элементов моста.

В 2000 году одновременно с началом реконструкции моста была разработана и внедрена информационно-измерительная система мониторинга (ИИСМ) состояния стационарных железобетонных пролетных строений и разводного пролетного строения моста Александра Невского через реку Неву в Санкт-Петербурге разработки АО НПП «Промтрансавтоматика».

Сформированная система мониторинга предусматривала контролирование следующих параметров:

- изменения напряженного состояния бетона конструкций главных балок стационарных пролетных строений (в • приопорных отсеках 7-8, 15-16, 16-17, и отсеках 9-10, 20-21 в пролетах);
- появления в бетоне стационарных пролетных строений новых трещин;
- величин раскрытия трещин, имеющих в бетоне стационарных пролетных строений (в отсеках 9-10 и 20-21);
- продольных деформаций стационарных пролетных строений;
- состояния канатов на предмет возможных разрывов проволок в канатах шпренгельной армату-

ры главных балок стационарных пролетных строений;

- изменения напряженного состояния металлоконструкций разводного пролетного строения;

- изменение температуры воздуха внутри и снаружи коробок главных балок стационарных пролетных строений (внутри – 2шт., снаружи – 2 шт.) с целью оценки температурной компенсации показаний датчиков.

В 2000-2004 годах проходила тестовая эксплуатация информационно-измерительной системы мониторинга. С течением времени в процессе эксплуатации сооружения функциональность системы постепенно уменьшалась по мере выхода датчиков из строя.

Неоднократные обследования и анализы работоспособности и функциональности системы (в основном выполненные силами специалистов кафедры «Мосты» ПГУПС) показали, что смонтированная часть системы мониторинга на мосту Александра Невского функционировала стабильно. Показания датчиков устойчивы. Циклические изменения показаний хорошо коррелировали с изменениями температуры элементов конструкций. Примеры диаграмм поведения датчиков, характеризующие соответствующие изменения напряженного состояния бетона конструкций главных балок стационарных пролетных строений и ширины раскрытия трещин, имеющих в них, а также показания датчиков контроля напряжений в металлоконструкциях разводного пролета, свидетельствовали о том, что после реконструкции элементы моста работают нормально и в расчетном режиме.

Тестовая (опытная) эксплуатация ИИС была продолжена до апреля 2004 г. В этот период проводился анализ программной и аппарат-

ной частей ИИС с соответствующей их корректировкой и дополнением. Однако добиться требуемой стабильности работы ИИС и достоверности получаемых результатов не удавалось. С одной стороны, многочисленные сбои в работе ИИС объясняются нарушениями работы датчиков и соединительных кабелей из-за их механических повреждений в процессе перманентно проводимых на мосту ремонтных работ и воздействия климатических факторов. С другой стороны – несовершенством применяемой компьютерной техники, периодическим отключением электроэнергии и др., что приводило к «зависанию» и сбоям в работе расчетных программ и порче базы данных.

Поэтому в 2009 году было принято решение о ее отключении. Качественно новая система, реализованная на мосту Александра Невского в 2020 г. по проекту 2018 г., учла все негативные моменты от «старой» системы. В ее основу были положены следующие аспекты:

- обоснование расположения средств мониторинга в соответствии с требованиями ст. 15, п. 6 Федерального закона [26], а именно численным моделированием т оценкой рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, что
- было выполнено на стадии проектирования в Концепции мониторинга;
- использование современных аппаратных средств мониторинга (датчиков), отличающихся большей надежностью, эффективностью (прежде всего, энергоемкостью), универсальностью («сопрягаемостью» друг с другом) и меньшими трудозатратами по установке и обслуживанию;
- разработано уникальное программное обеспечение, учитывающее все особенности сооруже-

жения, и обладающее высокими показателями надежности и эргономичности (удобство интерфейса, защита от внезапных отключений, архивирование с использованием современных баз данных);

- в программном обеспечении сформулирован и внедрен уникальный алгоритм, защищающий от ложных срабатываний системы, включающий в себя приоритет одних данных над другими, физическую основу подсистем мониторинга, длительность и цикличность наблюдений.

В ныне установленной системе мониторинга зоны и параметры контроля могут быть описаны при помощи следующей таблицы:

Как видно из таблицы 1, в системе мониторинга моста Александра Невского, установленной в 2020 г., присутствует несколько подсистем, имеющих абсолютно разные физические и геометрические базы, что позволяет достигнуть основную цель – получения точной и адекватной оценки состояния моста. Этого удалось добиться при помощи т.н. «интегрального мониторинга», т.е. мониторинга состояния конструкций, учитывающего по-

казания с датчиков в совокупности, используя внутренние алгоритмы программы, которые, в свою очередь, основываются на ответственности элементов конструкций, дублировании и цикличности повторения сигналов, защиты от ложных срабатываний.

В следующем разделе кратко приведены теоретические принципы (методы) работы подсистем мониторинга, указанных в таблице 1.

Методы исследования

Напряженно-деформированное состояние измеряется тензометрическим методом. Для этого существуют специальные датчики – тензометры. Они измеряют деформацию в определенной точке (зоне) элемента конструкции, и затем, используя закон Гука, определяются напряжения. Деформации, измеряемые на отрезке, называемом базой S, при работе в упругой стадии характеризуются малыми значениями. Тензометрами (рис. 3) а) измеряют абсолютное удлинение (укорочение) ΔS и по ним определяют среднюю относительную деформацию:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} \quad (1)$$

ЗОНЫ КОНТРОЛЯ, ПОДСИСТЕМЫ И КОЛИЧЕСТВО СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА

Таблица 1.

№ п/п	Наименование подсистемы мониторинга	Элементы моста со средствами мониторинга
1	Подсистема изменения динамических показателей (вибрационная подсистема / система контроля ускорений)	Наружные канаты усиления (48 шт.) Внутренние канаты (96 шт.) П-образные канаты усиления (976 шт.)
2	Подсистема контроля углов наклона	Балки стационарных пролетов (120 шт.)
3	Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния	Балки стационарных пролетов (400 шт.) Конструкции разводного пролета (64 шт.)
4	Контроль перемещений	Датчики на деформационных швах (8 шт.)
5	Контроль раскрытия трещин	Балки стационарных пролетов (80 шт.)
6	Подсистема спутникового позиционирования	Балки стационарных пролетов (17 шт.)
7	Контроль температуры элементов конструкций	Балки стационарных пролетов (200 шт.)

Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база S должна быть по возможности меньшей.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить ΔS – на базе, расположенной по направлению действующего усилия. По полученному значению и известному модулю упругости E вычисляются напряжения:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2)$$

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях.

Датчики располагаются вдоль главных напряжений μ_1 и μ_2 либо (если направления главных напряжений неизвестны) один датчик может быть установлен произвольно, а два других – под углами 45° и 90° или 60° и 120° к нему. В первом случае (известны направления главных напряжений) σ_1 и σ_2 определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \\ \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

μ – коэффициент Пуассона.

Во втором случае вычисления немного сложнее, но определяемы. Во избежание чрезмерности объема статьи не станем размещать соответствующие формулы. Вибрационная подсистема мониторинга предоставляет динамические па-

раметры сооружений в виде наборов ускорений и частотных картин колебаний при помощи акселерометров (рис. 3, б). Они (параметры) интегрально содержат данные о жесткостях, массах сооружения и внешних воздействиях. Результаты измерений при «динамическом мониторинге» позволяют выявить скрытые изменения прочностных свойств конструкций [12]. Таким образом, в задачи динамического мониторинга входит следующее:

- определение доминирующих частот свободных колебаний;
- оценка влияния сейсмической активности на динамическую работу сооружения;
- установление уровня влияния транспортных нагрузок на динамические характеристики;
- анализ частот с целью оценки и прогноза изменения технического состояния.

Необходимость решения поставленных в рамках динамического мониторинга задач открывает широкое поле как для исследований самих конструкций с оценкой развития в них скрытых повреждений, так и с точки зрения методик, инструментария и постановки задач мониторинга. И в связи с этим следует отметить, что одной из основных характеристик любой конструкции являются параметры собственных колебаний, представленные в виде набора частот и соответствующих им форм колебаний. Из динамики сооружений известно уравнение:

$$(C - \lambda E)\vec{v} = 0 \quad (4),$$

где

$C = A \times M$; A – матрица податливостей системы с n -степенями свободы;

M – диагональная матрица масс;

E – единичная диагональная матрица;

λ – собственное значение матрицы C ;

\vec{v} – собственный вектор матрицы C .

Подсистема контроля углов и смещений представляет из себя следующее. Выполненный авторами [27] анализ поведения деформации упругой линии стержня под влиянием внешних воздействий может быть описан рядом Фурье с использованием тригонометрических полиномов. При этом, как правило, достаточно использовать шесть-восемь членов в зависимости от формы и конструктивных особенностей исследуемого сооружения.

Располагать инклинометры (рис. 3, в) следует в точках пересечения гармоник ряда Фурье с осью стержня.

Форма деформируемого стержня под воздействием внешних факторов определяется функцией, полученной путем решения системы тригонометрических уравнений, в которую в качестве аргументов подставляются данные, полученные с помощью установленных инклинометров. Длина упругой линии стержня L будет соответствовать половине пространственного периода первой гармоники ряда Фурье. Следовательно, длина этого периода равна $2L$, и длины периодов T_i всех гармоник ряда определяются выражением

$$T_i = \frac{2L}{i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Тригонометрический полином в данном случае принимает вид $y(x) = y_0 + \sum_{i=1}^n (y_{si} \sin \frac{\pi i x}{L} + y_{ci} \cos \frac{\pi i x}{L}) \quad (6)$

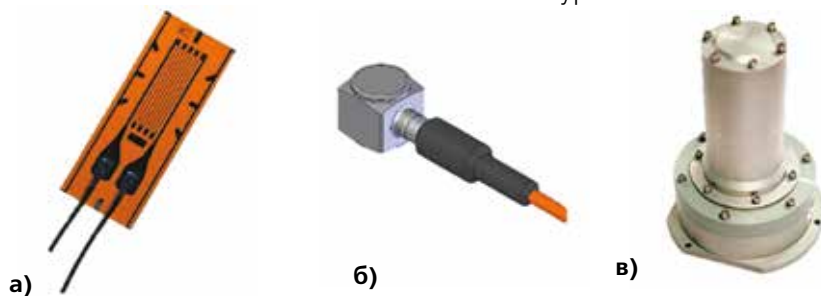


Рисунок 3. Общий вид основных средств мониторинга: а) – тензорезистор; б) – акселерометр; в) – инклинометр.

Датчики целесообразно устанавливать в точках, где фигурирующие в (6) функции – синус и косинус – принимают нулевые значения. Абсциссы таких точек на упругой линии балки для любых гармоник можно найти по формуле

$$x_{ik} = \frac{kL}{2i}, i = 1, \dots, n; k = 0, \dots, 2i \quad (7)$$

Подсистемы контроля перемещений пролетных строений в зонах деформационных швов и фиксации раскрытия трещин в балках стационарных пролетных строений используют одни и те же датчики разной базы измерения. Потенциометрические датчики предназначены для преобразования линейных перемещений в электрический сигнал, а также для воспроизведения простейших функциональных зависимостей в автоматических устройствах непрерывного типа. Представляет собой переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение, его входной величиной является линейное перемещение токосъемного контакта, а выходной величиной – напряжение, снимаемое с этого контакта, изменяющееся по величине при изменении его положения.

Подсистема спутникового позиционирования (ГНСС).

В основе спутниковой системы мониторинга деформаций лежит принцип дифференциального (относительного) спутникового позиционирования с помощью сигналов ГНСС.

Спутниковые приемники принимают радиосигналы от спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. После первичной обработки сигнала приемники передают «сырые» спутниковые данные на сервер для дальнейшей обработки. Данные спутниковых приемников содержат эфемеридную, навигационную информацию и фазовые отчеты.

Обработка спутниковой информации осуществляется с помощью программного обеспечения на компьютере (сервере) с помощью алгоритмов разрешения фазовой неоднозначности спутниковых ГНСС измерений, решения навигационной задачи и получения точного местоположения антенны приемников в дифференциальном режиме кинематического позиционирования – см. рис. 4.

Спутниковые приемники измеряют фазу несущих сигналов ГЛОНАСС/GPS, по которым вычисляются дальности до спутников в каждый момент времени по разностям фаз трех типов: простые, сдвоенные и строенные. Измерения выполняются, когда спутниковые приемники базовой станции и станции мониторинга принимают сигналы более четырех навигационных спутников. Геометрические дальности до спутников вычисляется методом разрешения фазовой неоднозначности OTF (On-the-fly – разрешение неоднозначности «на лету», используемое к быстро смещаемым точкам) или Quasy-Static (квази-статика, когда предварительно известны координаты точек и их смещение медленное).

После того как будут найдены геометрические дальности до спутников, методом пространственной линейной засечки определяется пространственный вектор (приращение координат) между спутниковыми антеннами базовой станции и станции мониторинга:

$$D = (XB - XA, YB - YA, ZB - ZA)T \quad (8)$$

где, XA, YA, ZA – значения координат точки мониторинга; XB, YB, ZB – значения координат базовой станции.

Базовая станция должна иметь точные координаты, чтобы по измеренным приращениям можно

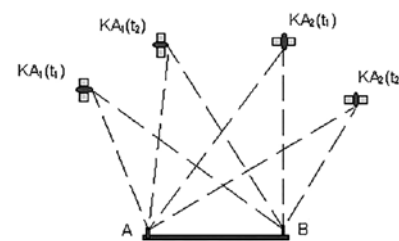


Рис. 4. Дифференциальный способ определения местоположения станций мониторинга.

было бы вычислить координаты точки мониторинга.

Результатом обработки являются точные пространственные координаты антенны приемников, установленных на критических точках объекта мониторинга, которые сравниваются с проектно-расчетными. Разница значений текущих и заданных проектных координат (пространственные смещения) выводится в графическом виде и сохраняется в цифровом для последующего анализа.

После того как определен вектор между спутниковой антенной базовой станции и станции мониторинга, а затем вычислены точные координаты точки мониторинга, они сравниваются с заданными проектными значениями и вычисляются разности на момент времени, равный эпохе наблюдений. Данные разности являются сутью смещений точки мониторинга:

$$dS = (XA0 - XAt', YA0 - YAt', ZA0 - ZAt')T \quad (9)$$

где,

XA0, YA0, ZA0 – заданные проектные значения координат точки мониторинга;

XAt', YAt', ZAt' – текущие определяемые значения координат точки мониторинга на эпоху t'.

Значения смещений точки мониторинга выводятся в виде графика (временного ряда) через интервалы времени соответствующие эпохам спутниковых наблюдений.

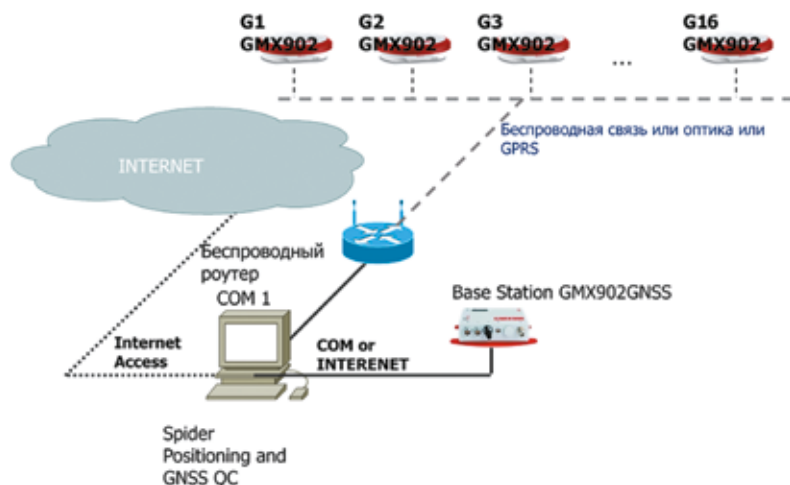


Рисунок 5. Принцип работы ГНСС оборудования автоматизированной системы деформационного мониторинга на мосту Александра Невского

Общий принцип работы ГНСС оборудования, примененный на мосту Александра Невского, представлен на рисунке 5, а реально установленные элементы – на рисунке 6.

В результате спутниковая автоматизированная система деформационного мониторинга получает координаты, а затем смещения в трех направлениях в каждой из точек приемника, как в абсолютных, так и в системе координат мостового перехода.

Результаты и выводы

Таким образом, на базе выполненного анализа технического состояния моста Александра Невского и критической оценки системы мониторинга, существовавшей на нем с 2000 по 2009 г.г., авторами была разработана и внедрена принципиально новая, качественно более совершенная, инновационная система мониторинга.

Она включает в себя несколько подсистем, имеющих под собой абсолютно разные физические принципы и параметры, обработка которых интегрально, в совокупности, позволяет получить достоверную картину о техническом состоянии сооружений. Использование при разработке данного «интегрального» мониторинга приоритетов и алгоритмов, разработанных авторами настоящей статьи, позволяет достоверно и качественно оценить техническое состояние моста. Научными результатами в соответствии с сформулированными ранее целью и задачами назовем следующие:

- выбор точек и зон контроля мониторинга, выполненный в полном соответствии с действующей нормативной базой на основе анализа технического состояния моста Александра Невского, позволяет сказать об отсутствии избыточности средств мониторинга, наличии четкой взаимосвязи между компонентами;

- использование в совокупности нескольких принципиально разных подсистем мониторинга позволяет обеспечить единую, интегральную оценку технического состояния моста;
- предварительный анализ работоспособности системы мониторинга позволяет сказать о ее высокой надежности и информативности.

Библиографический список

1. Sumitro S. Structural Health Monitoring System Applications in Japan / S. Sumitro, M.L. Wang. / In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht, 2005. – pp. 495-504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.
2. Rucker W. Guideline for structural health monitoring. Final report / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrmann. SAMCO, Berlin, 2006. – 63 p.
3. Li J and Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. MechSyst Signal Pr 2015; 60–61: 124–150.
4. Ana Paula Camargo Larocca, JoaoOlympio De AraujoNeto, Jorge Luiz AlvesTrabanco, Augusto Cesar Barros Barbosa, Andre Luiz Barbosa Nunes Da Cunha, Ricardo Ernesto Schaal. Uso de receptores GPS de 100 HZ nadeteccao de deflexoesverticaismilimetricas de pontes de concreto de pequenoporte [The use of GPS at a rate of 100 HZ to detect millimetric vertical deflections of small sized concrete bridges]. Bol. Cienc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 21, no 2, p.290-307, abr-jun, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200017>
5. Lienhart, W., Ehrhart, M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation - Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2015 DOI: 10.12783/SHM2015/58



Рисунок 6. ГНСС оборудование на мосту Александра Невского