

Екимов В.К., Федосеев В.Н., Енютин Ю.А., Литвинов В.А. (ГУП «Гормост»)
Штейнцайг В.М. (ЗАО «Могормаш»)
Левченко Е.М., Шумаков А.Б. (ЗАО «Аэротест»)
Бродский Г.С., Бродская Е.С., Волкова С.В. (AGA Group, Inc., США)

Применение мобильного измерительного комплекса для мониторинга мостовых сооружений

Отличительной особенностью эксплуатации инженерных сооружений в городе Москве является напряженная экологическая обстановка: повышенная загазованность атмосферы, сильная агрессивность среды, обусловленная, главным образом, применением противогололедных солей, умеренный климат с мягкой зимой и большим числом циклов замораживания-оттаивания, наличие в сооружениях большого числа различных коммуникаций, затрудняющих доступ для ремонта и содержания.

Подобные условия эксплуатации делают весьма желательным полное знание процессов, протекающих в конструкции и обоснованное прогнозирование деградации каждого мостового сооружения. Наиболее современным способом получения такой информации является инструментальный мониторинг, обеспечивающий контроль фактического состояния значимых и/или дефектных объектов, а также их конструктивных элементов [1].

Наряду с инспекциями [2], мониторинг позволяет не только получать информацию о состоянии сооружения, но и выявлять характер изменения этого состояния во времени, с тем, чтобы путем своевременного применения рациональных ремонтно-реабилитационных воздействий обеспечить надежное выполнение объектом своего функционального назначения.

Постоянный мониторинг в мировой практике предпринимается достаточно редко и только по отношению к отдельным сооружениям, причем по большей части с конкретными, весьма специфическими задачами, например, в тех случаях, когда:

- возможны ударные (внезапные) нагрузки из-за ненормированного прохождения сверхнормативных грузов либо по геофизическим (например, сейсмическим) причинам;
- замечена ускоренная деградация сооружения, но неясны ее причины;
- желательно зафиксировать момент отказа некоторых элементов, обеспечивающих защиту сооружения (например, деформационного шва), либо превышение допустимых значений параметров дефектов (например, раскрытие трещины);
- необходимо получить специальную информацию для исследовательских целей.

С методической точки зрения такой мониторинг правильнее было бы назвать «подконтрольной эксплуатацией» моста.

Уникальность большинства известных систем мониторинга транспортных сооружений объясняется, прежде всего:

- дороговизной и сложностью установки оборудования, причем в ряде случаев монтаж возможно осуществить только в процессе строительства сооружения (в качестве примера можно привести систему постоянного мониторинга сооружений типа SOFO [3]);
- сложность обработки больших массивов постоянно поступающей информации и неотработанность механизмов оперативного принятия решения на ее основе;
- ограниченность номенклатуры доступных к универсальному использованию приборных систем, предназначенных для постоянного использования на объектах, в том числе в условиях зимы.

Расширению области применения технологий мониторинга может способствовать метод долгосрочного мониторинга с использованием мобильного измерительного комплекса, разработанный и апробированный в ходе создания, под руководством Фонда МГРП при правительстве Москвы, Системы Управления Эксплуатацией Мостовых Сооружений (СУЭМ). Мобильный измерительный комплекс состоит из приборов многоразового использования, не требует сложных монтажных работ и может применяться на разных типах объектов, в том числе круглогодично, в условиях холодного климата. Комплекс сопровождается специальной методикой

обработки больших массивов информации с целью быстрого выявления дрейфа измеряемых величин и прогнозирования состояния объекта в целом.

Основой мобильного измерительного комплекса является технология непрерывного измерения и записи физических параметров (рис. 1), и центральным звеном здесь является информационный накопитель (ИН), производящий опрос датчиков и концентрацию результатов измерений в собственной памяти для последующего анализа [4]. Разумеется, как датчики, так и информационный накопитель должны обладать надежностью и живучестью, достаточными для обеспечения их непрерывного функционирования в эксплуатационных условиях, реальных для контролируемой техники.

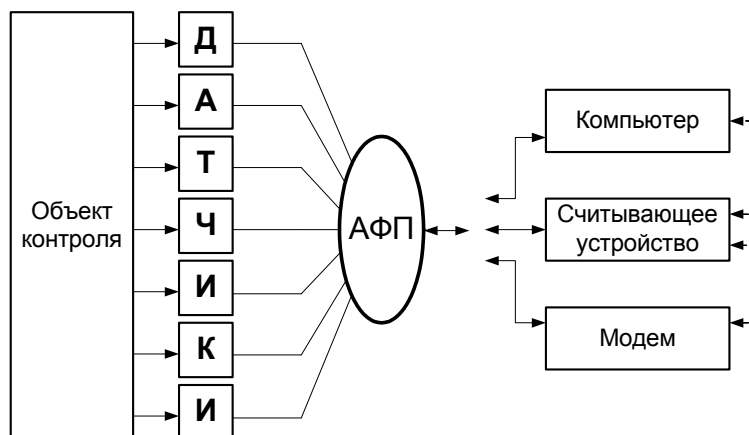


Рис. 1. Принципиальная схема непрерывного контроля физических параметров.

Аппаратным обеспечением решения задачи применительно к мостовым сооружениям является разработанный ЗАО «Могормаш» с участием авторов специальный информационный накопитель – анализатор физических параметров типа АФПу (Табл. 1, рис. 2).

Таблица 1. Технические характеристики анализатора физических параметров АФПу

Характеристика	Значение
Количество аналоговых входов для подключения датчиков с выходным сигналом по напряжению	6
Количество входов для подключения резистивных датчиков	2
Диапазон измеряемого сигнала, В	0 - 6
Номинальное напряжение питания, В	12
Диапазон напряжения питания, В	6-20
Номинальный потребляемый ток, мА	20
Точность измерений, % от полной шкалы	0,024
Память для хранения результатов измерений, Кбайт	256
Длина записи одного измерения (8 каналов и временная метка), Байт	16
Максимальное количество записей	16384
Период опроса	1 секунда 1 минута 1 час
Габариты, мм	101x195x34
Вес, г	270

Конструктивное ядро анализатора - перепрограммируемый микроконтроллер с восьмиканальным аналого-цифровым преобразователем, снабженным энергонезависимыми часами реального времени, собственной памятью емкостью 512 КБ, последовательным интерфейсом RS232

для связи с компьютером или другим аналогичным устройством, а также аналоговыми и цифровыми входами (выходами) для подключения дискретных датчиков (управления внешними цепями).

Наличие перепрограммируемого Flash-микроконтроллера дает возможность гибкого изменения режима работы устройства АФПу в зависимости от варианта обработки информации, получаемой с аналоговых/цифровых входов. Например, при необходимости регистрации сигналов по каждому из каналов с заданным интервалом времени и записи этой информации в энергонезависимую память устройства прибор работает как электронный самописец (графическая интерпретация результатов измерений представлена на рис.3).

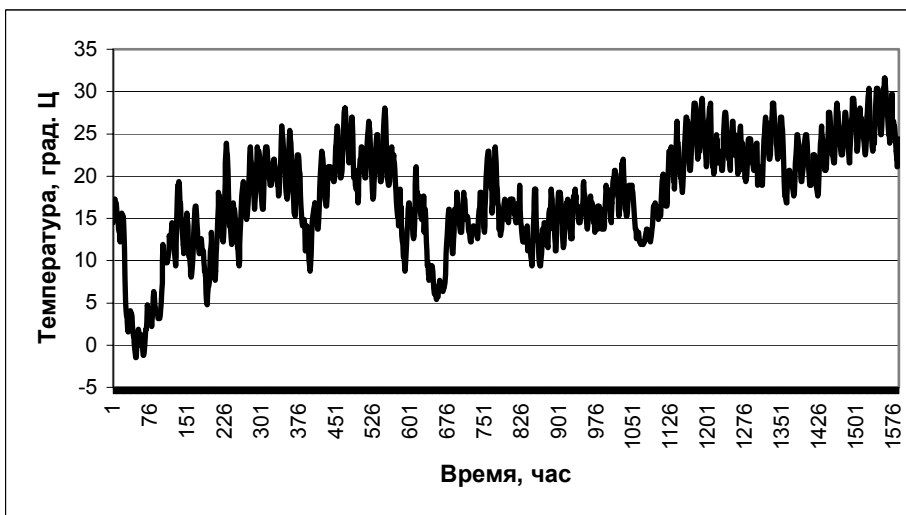


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов работы АФПу в режиме «Электронный самописец». На примере измерения температур (первичный датчик - Omega 44030).

С помощью устройства АПФу возможно определение времени нахождения конструкции в том или ином состоянии под определенной нагрузкой или в различных критических режимах. Устройство при этом функционирует как накопитель. Количество уровней (интервалов) гистограммы определяется настройкой (для АФПу – не более 10). Графическая интерпретация результатов измерений для этого случая представлена на рис. 4.



Рис. 4. Интерпретация результатов работы АФПу в режиме «Накопитель». На примере измерения нагрузки (первичные датчики – МД-400П).

Внутреннее программное обеспечение устройства предусматривает также введение специальных эталонных параметров и критериев оценки обработанной информации, по результатам сравнения с которыми производится выдача управляющих сигналов, например, сигнала тревоги.

Во всех случаях считывание информации осуществляется по интерфейсу RS232, при помощи переносного компьютера, либо промежуточного считывающего устройства, оснащенного буквенно-цифровым индикатором для быстрой оценки считанной информации. Возможно также применение более сложных устройств (модемов и преобразователей) для периодической передачи информации от АФПу к удаленному диспетчерскому пункту по специальной кабельной или регулярной телефонной линии. Приборы устанавливаются на мостовом сооружении в специальном антивандальном корпусе.

Прибор АФПу инвариантен к типу применяемых датчиков, если их выходной сигнал находится в согласованном диапазоне, в связи с этим, пригоден для использования для решения самых разнообразных задач, например при измерении:

- силовых параметров, например: усилий, давлений, напряжений;
- кинематических параметров, в том числе: перемещений, углов поворота, деформаций, скоростей, ускорений;
- климатических параметров, таких, как: температура, влажность, скорость и направление ветра;
- электрических параметров, таких, как напряжение и ток.

Естественно, при этом требуются соответствующие первичные преобразователи. В настоящее время производится громадная номенклатура датчиков, однако при использовании большинства из них на мостовых сооружениях требуется конструктивная доработка, связанная не только с подбором соответствующих выходных параметров, но также и с необходимостью обеспечения защиты от внешних воздействий, электроснабжения, приемлемого монтажа и т.п. (иллюстрируется рис. 6)

Для работы с прибором АФПу на мостовых сооружениях г. Москвы разработан специальный комплект первичных датчиков, параметры которого приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные технические характеристики датчиков комплекта ИН-МГМ (сертифицирован: сертификат Ростеста №.....)

Тип датчика	Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Погрешность измерения	Температурный диапазон	питание
SCD-SE	Линейное перемещение	0-12.5мм 0-2.5мм	0-5 Вольт	0.25%	- 25 °С + 85 °С	+8.5..28 В
RVIT	Угловое перемещение	+ - 60°	+ - 3 В	0.35%	- 25 °С + 85 °С	+ 5 В
3274-10К	Нагрузка	До 5т	2±0,25% мВ/В	±0,10%	-18°С +120°С	20В
3274-20К	Нагрузка	До 10т	2±0,25% мВ/В	±0,10%	-18°С +120°С	20В
3275-1010-50К	Нагрузка	До 25т	2±0,25% мВ/В	±0,10%	-18°С +120°С	20В
3277-101-200К	Нагрузка	До 100т	2±0,25% мВ/В	±0,10%	-18°С +120°С	20В
ЕЕ06	Отн.влажность, температура	0-100%RH -40+60 °С	0-1 В		-40 °С +60 °С	+4.5..30 В
ЕЕ65	Скорость и направление ветра	0-20 м/сек	0-10 В	0.3м/сек+4%	-20 °С +50 °С	24 В
44030	Температура	-40+75°С		±0.1°С	до 150°С	нет

Входящие в комплект датчики выполнены в герметичных корпусах, что обеспечивает как защиту от механических повреждений, так и высокую стабильность измерений в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Энергоснабжение от батареи или иного источника питания с напряжением от 8.5 до 28 вольт постоянного тока, равно как и съём выходного сигнала осуществляется через стальной герметичный присоединительный разъем. Датчики не оказывают влияния на работу друг друга и иных приборов. Внутренняя регулировка обеспечивает защиту от пульсаций напряжения, а также исключительную стабильность выходного сигнала и высокое шумоподавление.

Передача сигнала от датчиков к накопителю, устанавливаемому в удобном, доступном месте, производится по проводным линиям, закрепляемым к конструкциям сооружения. В случае удаленности первичного датчика от накопителя информации на расстояние более максимально допустимого, применяются специально согласованные трансмиттеры. Трансмиттеры предназначены для усиления и стабильной передачи электрических сигналов. Комплект трансмиттеров типа TX1500, предлагаемых для использования совместно с прибором АФПу и первичными датчиками, выполнен в герметичном термоизолирующем кожухе и снабжен дополнительным устройством для подключения к сети 220 В переменного тока.

Эксплуатация комплексов долгосрочного мониторинга ИН-МГМ на Москворецком и Автозаводском мостах в течение 2002-2003 г.г. показала удовлетворительную надежность и стабильность работы. Примеры полученных данных приводятся на рис. 7

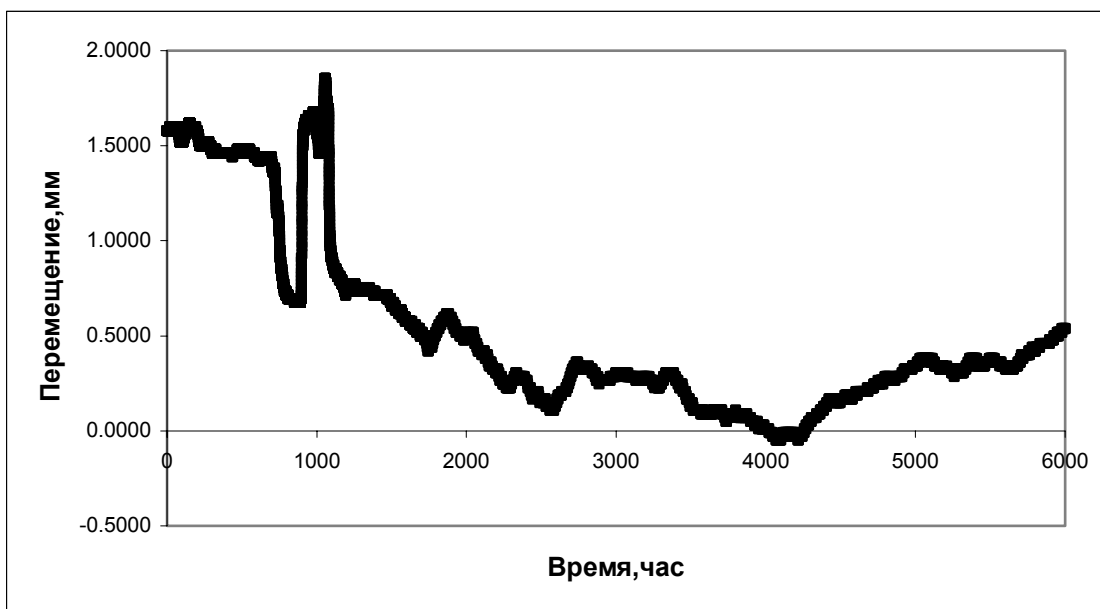


Рис.7а. Диаграмма изменения перемещения штока датчика SSE2.5 #1 во времени, построенная по данным замеров на Москворецком мосту.

Из рис.7б. видно, что результатом долгосрочного мониторинга является огромное количество данных, которые сложно оперативно обработать и проанализировать. Так, например, полная таблица данных по датчику SSE2.5#1 за 6 месяцев имеет 2901 строку.

Поэтому требуется разработать такой метод первичной обработки результатов мониторинга, который позволил бы предложить пользователю не бесконечные таблицы выходных данных, но сокращенный массив в визуализируемой форме, удобной для дальнейшего анализа. При этом, разумеется, необходимо предотвратить отбраковку значимых результатов измерений, которая могла бы привести к неправильной трактовке результатов мониторинга. Для достижения этой цели производится первичная обработка выходных данных.

Интервал	Смещение1 [2,5 мм]	Дата	Время
часы	мм	Дата	Время
0:00:00	1,578431	11.02.2003	13:36:04
0:15:00	1,578431	11.02.2003	13:51:04
0:30:00	1,578431	11.02.2003	14:06:04
0:45:00	1,578431	11.02.2003	14:21:04
1:00:00	1,578431	11.02.2003	14:36:04
1:15:00	1,578431	11.02.2003	14:51:04
1:30:00	1,578431	11.02.2003	15:06:04
1:45:00	1,578431	11.02.2003	15:21:04
2:00:00	1,578431	11.02.2003	15:36:04
2:15:00	1,578431	11.02.2003	15:51:04
.....			
2931:23:49	0,264706	13.06.2003	16:59:53
2932:53:49	0,264706	13.06.2003	18:29:53
2934:23:49	0,264706	13.06.2003	19:59:53
.....			
6040:23:10	0,558824	21.10.2003	5:59:14
6041:53:10	0,558824	21.10.2003	7:29:14
6043:23:10	0,558824	21.10.2003	8:59:14
6043:32:58	0,558824	21.10.2003	9:09:02

Рис. 76. Фрагмент таблицы данных результатов измерений перемещения штока датчика SSE2.5 #1, считанная с информационного накопителя

Результаты измерений, сохраненные в собственной памяти информационного накопителя, при считывании преобразуются специальной программой в электронные таблицы формата Excel. В таблицах отражены: дата и время проведения измерения, а также и результаты измерений по каждому каналу в виде величин электрического сигнала.

Этот исходный массив хранится в базе данных в виде файла, увязанного с информацией о проекте мониторинга, в котором имеются сведения о месте установке, типах и технических характеристиках датчиков. С использованием указанных сведений производится перевод результатов показаний прибора из единиц электрических измерений (вольты) в единицы измеряемых величин (градусы Цельсия, миллиметры и т.д., см., например рис. 76.). Уменьшение объема исходного массива осуществляется за счет исключения несущественных значений. Несущественными считаются все повторяющиеся данные, с учетом погрешности измерительного комплекса, которая оценивается как сумма погрешностей датчика и накопителя:

$$\Delta_{\text{комп}} = \Delta_{\text{накоп.}} + \Delta_{\text{датч.}}$$

Так, например, погрешность датчика линейных перемещений с диапазоном 2.5 мм и выходным сигналом 0-6 В составляет 25% от полной шкалы, т.е. $\Delta_{\text{датч.}} = 0.25 \cdot 2.5 / 100 = 0.00625 \text{ мм}$. Погрешность накопителя с диапазоном измерения 0-10 В и разрядностью 256 при работе с упомянутым датчиком составит $\Delta_{\text{накоп.}} = 2.5 / [6 / (10 / 256)] = 0.01666 \text{ мм}$. Полная погрешность измерения составит $\Delta_{\text{комп}} = 0.00625 + 0.01666 = 0.02291 \text{ мм}$

При обработке массива каждое последующее измеренное значение сравнивается с первым и, если разница находится в пределах погрешности комплекса, то значение отбрасывается. Если разница выходит за рамки погрешности, то значение сохраняется и последующее значение сравнивается уже с ним. Практика показывает, что для мостовых сооружений относительная доля несущественных

данных может составлять более 99% от общего количества (см. табл. 4 ниже), а значит, подобная отбраковка существенно облегчает визуализацию без искажения результатов измерений.

Для выявления сомнительных результатов производится статистическая обработка данных. При этом используется критерий грубых ошибок, то есть вычисляются границы рассеяния значений измеряемой величины в виде:

$$u_{\min} = \underline{N} - k_{\sigma}\sigma_N,$$

$$u_{\max} = \underline{N} + k_{\sigma}\sigma_N.$$

Коэффициент k_{σ} определяется по рекомендациям работы [5] и для предельной относительной ошибки $\pm 0,05$ и 25-ти измерений составляет 2,717. Измеренные величины, выходящие за границы отрезка $[u_{\max}; u_{\min}]$, можно отбраковать, считая грубыми ошибками измерений (сомнительными результатами), и затем, для оставшихся значений вновь вычислить статистические характеристики. Однако в нашем случае отбраковка сомнительных результатов не производится, поскольку без специального анализа невозможно определить, действительно ли данный результат является случайной ошибкой, либо он вызван одной из следующих причин:

- неисправностью какого-либо элемента измерительного комплекса (повреждением кабеля, поломкой датчика, снятием электропитания и т.п.);
- внезапной ненормативной нагрузкой;
- скачкообразной деградацией какого-либо элемента сооружения.

Регистрация перечисленных ситуаций является одной из важнейших задач мониторинга, поэтому при обработке результатов сомнительные значения не отбрасываются, а напротив, выделяются для последующего экспертного анализа.

Таблица 3. Пример статистической обработка результатов измерений

Интервал		Смещение 3 [12,5 мм]	δ	Математическое ожидание δ	Дисперсия δ	Выполняется ли условие критерия грубых ошибок	Дата	Время
				m	δ			
Hours	Hours	мм					Date	Time
0:00:00	0	2,696078					11.02.2003	5:14:14
52:15:00	52	2,892157	0,196079	0,000193	0,000036	Да	13.02.2003	9:29:14
52:30:00	52,5	2,892157	0,000000	0,000000	0,000000	Да	13.02.2003	9:44:14
92:45:00	92	2,696078	-0,196079	-0,000193	0,000039	Да	15.02.2003	1:59:14
93:00:00	93	2,696078	0,000000	0,000000	0,000000	Да	15.02.2003	2:14:14
154:15:00	154	2,892157	0,196079	0,000193	0,000036	Да	17.02.2003	15:29:14
154:30:00	154,5	2,892157	0,000000	0,000000	0,000000	Да	17.02.2003	15:44:14
278:45:00	278	2,892157	0,000000	0,000000	0,000000	Да	22.02.2003	19:59:14
.....
526:04:51	526	6,421569	3,529412	0,003470	0,012224	Нет	04.03.2003	3:19:05
731:58:31	731	6,617647	0,196078	0,000193	0,000036	Да	12.03.2003	17:12:45
.....

Математическое ожидание δ	0,003567
Дисперсия	0,466197
СКО	0,682786
$3\Sigma\delta$	2,048359
$m\delta-3\Sigma\delta$	-2,044792
$m\delta+3\Sigma\delta$	2,051926

В качестве иллюстрации в табл. 3. приведена выборка из таблицы статистической обработки для датчика линейных перемещений, расположенного на термошве Москворецкого моста

В результате анализа сомнительных данных за 8 месяцев мониторинга двух мостов в г. Москве в период с февраля по ноябрь 2003 года были выявлены следующие нештатные ситуации:

- отключение электропитания системы мониторинга в течение 4 суток;
- неисправность кабельной линии питания датчика перемещения;
- механический сбой приспособления установки датчика.

Неисправностей собственно датчиков или информационных накопителей за этот период установлено не было, что свидетельствует об удовлетворительной надежности измерительной системы в целом.

В табл. 4 сведены данные об эффективности обработки данных мониторинга Москворецкого и Автозаводского мостов по вышеописанной схеме.

Таблица 4. Эффективность обработки результатов мониторинга

Прибор	Размерность массивов, строк		Эффективность отбраковки, %	Количество сомнительных результатов
	Исходного	После отбраковки несущественных значений		
Датчик перемещений №11	9701	314	96.76	7
Датчик перемещений №12		2	99.98	1
Датчик перемещений №13		72	99.26	1
Датчик перемещений №21	8732	653	92.52	27
Датчик перемещений №22		262	97.00	1
Датчик перемещений №23		1018	88.34	13
Датчик перемещений №31	8735	38	99.56	0
Датчик перемещений №32		34	99.61	0
Датчик перемещений №41	21854	176	99.18	0
Датчик перемещений №42		168	99.22	1
Датчик темпер.-влажности		3395	84.97	25

График зависимости смещения от времени, построенный по выходным данным, полученным после обработки, в целом соответствует графику, построенному на основании «необработанных» данных исходного массива.

Более детальное сравнение кривых, построенных по данным «обработанного» и «необработанного» массива, показало, что искажения данных при обработке не происходит, а устраняется только «шум». При этом могут изменяться экстремальные значения, но не более, чем на величину суммарной ошибки измерения (рис.9).

С целью снижения трудоемкости обработки результатов и приведения полученной информации к виду, удобному для дальнейшего анализа, предусмотрена разработка специального программного продукта, обеспечивающего выполнение следующих задач:

- прием файлов в стандартных форматах;
- перевод электрических единиц записи в единицы измеряемых величин;
- сохранение исходных данных, полученных с накопителя, в виде отдельных файлов;
- возможность дополнения имеющихся файлов новыми данными;
- первичная отбраковка данных, предусматривающая отбраковку данных, находящихся в пределах суммарной погрешности приборов;
- вычисление статистических характеристик, таких как математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации;
- вычисление алгебраических функций данных, например, вычисление разности показаний датчиков разных накопителей с обеспечением синхронизации по времени;
- построение различных графиков.

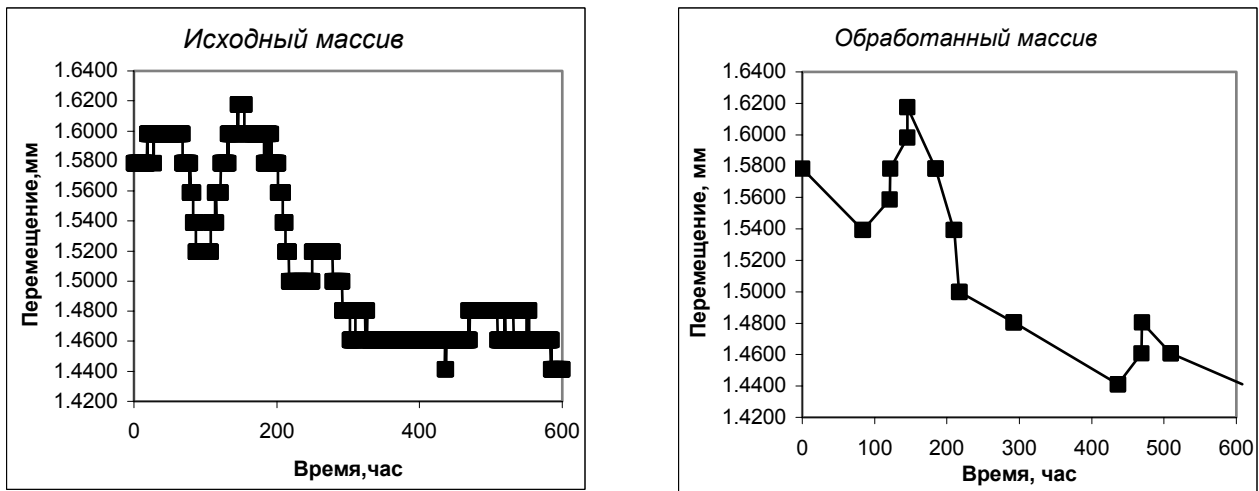


Рис. 9. Детальное сравнение диаграмм перемещения штока датчика SSE2.5 #1 за 600 часов работы.

Кроме того, в программе предусмотрен справочный файл с описанием типов первичных датчиков, их технических характеристик, погрешностей измерений каждого датчика и накопителя информации.

Описанное выше оборудование позволяет производить не только прямые измерения, но и косвенные с последующим пересчетом искомых параметров. Так, на Москворецком мосту основной задачей является контроль за высотном положением замка трехшарнирного берегового свода. Поскольку прямые измерения оказались невозможными из-за автопроезда под мостом, принятая методика предусматривает замеры раскрытия зазоров конструкции в шарнирах. Схема установки датчиков перемещения, измеряющих, по существу, прогиб в характерных точках, приведена на рис. 10. Аналогично решена задача на балочно-консольном Автозаводском мосту, где ведется контроль за изменением ширины зазора между смежными консолями в центральном шарнире в уровне верхней и нижней плиты короба пролетного строения.

В основе методики пересчета перемещений лежат результаты пространственного расчета, показывающие линейную зависимость между перемещениями элементов свода и перемещениями, измеряемыми датчиками. При этом перемещения в местах установки датчиков (d_i) определяются следующими факторами:

- горизонтальное смещение опор (Δ_l и Δ_n);
- действие временной нагрузки ($\Delta_{вр}$);
- перепад температуры (Δ_{t°).

и могут быть записаны в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_l = K_l^{\Delta_l} * \Delta_l + K_l^{\Delta_{вр}} * \Delta_{вр} + K_l^{\Delta_{t^\circ}} * \Delta_{t^\circ} + K_l^{\Delta_n} * \Delta_n \\ d_3 = K_3^{\Delta_l} * \Delta_l + K_3^{\Delta_{вр}} * \Delta_{вр} + K_3^{\Delta_{t^\circ}} * \Delta_{t^\circ} + K_3^{\Delta_n} * \Delta_n \\ d_n = K_n^{\Delta_l} * \Delta_l + K_n^{\Delta_{вр}} * \Delta_{вр} + K_n^{\Delta_{t^\circ}} * \Delta_{t^\circ} + K_n^{\Delta_n} * \Delta_n \end{array} \right.$$

где d_l , d_3 и d_n - измеренные перемещения в местах установки датчиков (в левой опоре, в замке и в правой опоре соответственно);

Δ_l и Δ_n – перемещение, определяемое горизонтальным смещением опор;

$\Delta_{вр}$ – перемещение, определяемое действием временной нагрузки;

Δ_{t° - перемещение, определяемое перепадом температуры;

K_i^j – коэффициенты пропорциональности от единичных перемещений; определяются расчетом по конечно-элементной модели.

Учитывая, что:

- временная обращающаяся нагрузка при интенсивном движении носит равномерно-распределенный характер;
- одиночная тяжеловесная временная нагрузка маловероятна на данном мосту, равно как и фиксация ее датчиками с периодичностью опроса более 0.5 часа.
- прогиб (выгиб) свода в замке от временной нагрузки много меньше прогиба (выгиба) от перепада температуры;
- температурное воздействие носит симметричный характер и по своему проявлению аналогично временной равномерно-распределенной нагрузке,
- контрольные замеры методами геодезии дают суммарное воздействие от временной нагрузки и перепада температуры,

можно допустить, что $\Delta_{вр} + \Delta_{т^o} = \Delta_{в}$, где $\Delta_{в}$ – вертикальное перемещение в шарнире. Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} d_1 = K_1^{\Delta_l} * \Delta_l + K_1^{\Delta_B} * \Delta_B + K_1^{\Delta_{п}} * \Delta_{п} \\ d_3 = K_3^{\Delta_l} * \Delta_l + K_3^{\Delta_B} * \Delta_B + K_3^{\Delta_{п}} * \Delta_{п} \\ d_{п} = K_{п}^{\Delta_l} * \Delta_l + K_{п}^{\Delta_B} * \Delta_B + K_{п}^{\Delta_{п}} * \Delta_{п} \end{cases}$$

В данной системе уравнений значения Δ непосредственно измеряются датчиками перемещений, установленными согласно схеме рис. 10.

Любопытно, что мониторинг за перемещениями пролетным строением выявил неудовлетворительную работу замкового шарнира, которая проявлялась в дискретности и запаздывании перемещений до нескольких часов по сравнению с шарнирами в пятах сводов. Кроме того, установлено, что прогибы конструкции на северной и южной сторонах различаются в 2.5-3 раза, что хорошо коррелируется с данными геодезических съемок.

Выводы:

1. Использование мобильного измерительного комплекса позволяет существенно расширить область применения технологии инструментального долговременного мониторинга транспортных сооружений.
2. Важнейшим преимуществом комплекса является возможность его многократного использования, а также достаточная простая технология монтажа, применимая на любой стадии жизненного цикла сооружения. С учетом наличия большой номенклатуры первичных датчиков, совместимых с информационными накопителями и позволяющих обеспечить надежное измерение разнообразных физических параметров, это создает возможности для разработки новых методов анализа поведения мостовых сооружений.
3. Предложенный метод первичной отбраковки данных при всей своей простоте весьма эффективен, так как, за счет отбраковки неинформативных данных, позволяет, без искажения картины, визуализировать и сделать доступными для анализа результаты длительного мониторинга.

Литература:

1. V. M. Kuznetsov, G. Tseitlin, V. Hitrov, J. Zaitchik, G. Brodski, E. Brodskaia, Y. Enutin, V. Shesterikov "Bridge Management System for City of Moskow" – 9th International Bridge Management Conference, Orlando, Florida, USA.
2. Екимов В. К., Федосеев В. Н., Енютин Ю. А., Бродский Г. С., Сапронов И. М. Первый опыт стандартной инспекции мостов. «Наука и техника в дорожном строительстве», №1, 2004, с.
3. Приборы и оборудование для инспектирования, диагностики и обслуживания мостовых сооружений. ЗАО «Могормаш», Москва, 2003 год

4. Бродский Г.С., Шмарьян Е.М., Гавинский Ю.А. Инструментальный комплекс для исследования и контроля эксплуатационных параметров тяжелых экскаваторов. 10-я Всесоюзная конференция по молекулярной электронике, Краснодар, 1986 г.
5. Crow E.L., Davis F.A., Maxfield M.W. Statistics manual. Dover Publications, NY, USA, 288 p.