

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 004.92

А.Ю. Олейник,
асп.

А.В. Макшанов,
д-р техн. наук, проф.

В.Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

DEVELOPMENT MONITORING SYSTEM STRAIN ENGINEERING AT THE WEB-BASED AND MICROCONTROLLERS

Предложена принципиальная технология для контроля деформаций и перемещений строительной части гидротехнических сооружений. Описана разработанная аппаратура для проведения измерений, принципы ее работы и информационная система учета и анализа поступающих данных. Отличительной особенностью всех разработок является применение открытых платформы Arduino и открытых технологий для создания программного обеспечения. Предложена сетевая структура измерительного комплекса, позволяющая в короткие сроки и при минимальных затратах построить контрольную сеть мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений. Разработана система для оценки текущего состояния строительной части на основе группы интегральных критериев, что обеспечивает точность и однородность при анализе поступающих данных. Обоснована возможность построения системы сигнализации о недопустимых режимах эксплуатации гидротехнического сооружения.

Article presents a fundamental technology for the control of deformations and displacements in construction of hydrotechnical structures. The developed equipment for measurement, how it works and information system for accounting and analysis of the incoming data. A distinctive feature of all developments is the use open source Arduino platform and open source technology for creating software. Proposed network structure measuring complex, allowing you to quickly and at minimal cost to build a test network condition monitoring of hydrotechnical structures. Developed a system to assess the current state of the construction of the group on the basis of integral criteria that ensures the accuracy and consistency when analyzing incoming data. The possibility of constructing a system of signaling improper operation of a hydrotechnical structures.

Ключевые слова: мониторинг, гидротехнические сооружения, деформации, контроль параметров, комплексный анализ, обеспечение безопасности.

Key words: monitoring, hydraulic structures, deformation, control parameters, complex analysis, security.

СОВРЕМЕННЫЕ сложные инженерные строительные сооружения — в частности гидротехнические сооружения (ГТС) — в результате влияния природных и человеческих воздействий различного характера могут испытывать значительные статические и динамические нагрузки, вызывающие перенапряжение и деформацию несущих конструктивных элементов. Указанные причины могут привести к нарушению целостности и последующему разрушению сооружения. Подобные воздействия также могут сопровождаться перемещением сооружения (или элементов его конструкции) в пространстве. При этом пространственные изменения положения сооружения (или элементов его конструкции) носят как постоянный (статический), так и временный (динамический) характер.

Долговременную безаварийную работу тонких подпорных стенок обеспечивают систематические наблюдения. Цель этих наблюдений состоит в получении информации о действительном техническом состоянии конструкций, необходимой для назначения оптимального режима их дальнейшей эксплуатации. Как правило, такие наблюдения ведутся с использованием инструментальных средств в ручном режиме. Автоматизация измерений позволит существенно сократить затраты, увеличить объем и качество контролируемых параметров, а в перспективе — вносить изменения в условия эксплуатации, что увеличит технический ресурс работы ГТС.

В работах [1]–[4] представлены методики и аппаратура для проведения автоматизированного мониторинга технического состояния ГТС, разрабатываемые в ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». В аналогичных по функционалу разработках [5]–[7] используется другая измерительная аппаратура (по стоимости и принципам действия).

Данная статья посвящена решению задач по построению методик и техники наблюдений, направленных на обеспечение прогнозирования характера напряженно-деформированного состояния сооружений и работоспособности при длительной эксплуатации. Решение поставленных задач основывается на использовании аппарата математической статистики.

Инструментальное наблюдение за эксплуатируемыми опорными стенками ГТС должны включать:

- регистрацию вида нагружений;
- регистрацию смещений верха стенок;
- измерение прогибов упругой линии стенок.

В долговременном плане эти наблюдения должны также включать текущий контроль:

- изменения прочности конструкционного материала (бетона);
- коррозии стального шпунта и анкерных тяг;
- изменения относительной плотности грунта засыпки.

Интегральным эффектом процесса взаимодействия тонкой подпорной стенки с грунтом основания является постепенное нарастание напряжений в ее элементах. Величина смещения верха конструкции позволяет судить об изменении ее напряженного состояния и степени общей устойчивости, а прогиб упругой линии — о напряжении в стенке.

Для правильной оценки результатов измерений необходимо отслеживать динамику изменения параметров во времени в зависимости от внешних факторов. Все данные измерений должны фиксироваться вместе с указанием окружающей ситуации (действующие нагрузки, уровень воды в засыпке, температура воздуха и т.п.). Удаление опоры от линии кордона стенки должно быть не менее величины $L \operatorname{ctg} \varphi$, где L — свободная высота сооружения, φ — угол внутреннего трения грунта засыпки. Обследуемый участок стенки выдерживается под нагрузкой до стабилизации вызванных ею деформаций.

Исходным соотношением для оценивания параметров напряженного состояния стенки служит уравнение упругой линии, связывающие с прогибами перерезывающие силы $Q(x)$ и нагрузку на стенку $N(x)$. Выражение для изменения нагрузки N и прогиба y во времени получают, решая совместно уравнение упругой линии балки и уравнение состояния вязкого элемента, что приводит к соотношениям:

$$y(x, t) = \frac{x^2}{2EI} \left[P(H - \frac{x}{3}) - N(t) \frac{2h}{3} \right], \quad N(t) = W \exp(-Bt), \quad W = \frac{3P}{2h} \left(H - \frac{h}{3} \right), \quad B = \frac{3EI}{\eta h^3}. \quad (1)$$

Здесь P — постоянная сила, приложенная на расстоянии H от опоры; h — длина участка между опорами; EI — жесткость элемента; η — вязкость линейно-ползучего элемента.

Наибольший интерес представляют изгибающие моменты в стенке, по величинам которых можно определить напряжения в материале конструкций. Они оцениваются по формуле

$$M(x, t) = P(H - x) - W(h - x) \exp(-Bt). \quad (2)$$

Для аппроксимации измеренных упругих линий тонких подпорных стенок используется формула Л. Л. Лякмунда:

$$y = p(x) \exp(-\alpha(x-\beta)^2). \quad (3)$$

По результатам измерений строятся графики зависимости оцениваемых параметров от интенсивности нагрузки (отдельно для ближней и дальней зон нагружения). На их основе устанавливается закономерность приращения усилий, которая служит для назначения допустимой нагрузки.

Специфика рассматриваемого подхода состоит в том, что он не требует специальной серии пробных нагружений, анализ проводится в ходе нормального рабочего процесса конструкции.

Процессы старения конструкции обычно анализируются по динамике снижения во времени допустимой нагрузки. Имеется гипотеза, согласно которой степень деградации конструкции можно оценить на основе наблюдений за процессами обратной релаксации при снятии нагрузки. Эти выводы соответствуют границе разрешающей способности аппаратуры и возможны только за счет статистической обработки больших массивов данных. Оценка возможности получения рабочей методики таких выводов является одной из целей проводимого эксперимента.

Оценка деформации гидротехнических конструкций — более трудная задача, требующая разработки как специализированных методологий, так и специального оборудования, обладающего повышенной точностью для измерения кинетических особенностей угловых смещений и наклонов элементов конструкций, осадки и прочих возможных случаев деформаций. Вся информация об изменении геометрической топологии конструкции должна собираться непрерывно в реальном масштабе времени, так как разовые геодезические съемки не дают достоверных данных о техническом состоянии гидротехнических сооружений (ГТС), которые могут быть подвержены повторяющимся кратковременным обратимым деформациям, связанным с причаливанием судов, разгрузкой (погрузкой) грузов, естественной осадкой конструкций, ледовой нагрузкой и др.

Мониторинг состояния ГТС будет проводиться на базе микропроцессоров и интернет-технологий. На основе непрерывного анализа статистических данных, полученных в реальном масштабе времени в «контрольных точках» гидротехнического сооружения, строится статистическая модель состояния ГТС. В результате статистическая модель вместе с теоретической (математической) моделью включаются в контур мониторинга и систему диагностирования состояния гидротехнического сооружения. «Статистическая» модель строится, например, на основании метода группового учета аргументов, то есть построения матрицы (векторных) величин контрольных параметров группы в программно заданное время (опроса параметров). Обе модели включаются в контур мониторинга, и решение о фактическом состоянии ГТС в текущий момент времени принимается с учетом прогнозных значений полученных по модели и данных измерений. Значения параметров моделей уточняются на основании проводимых измерений и полученных расхождений в значениях, рассчитанных по моделям и по измерениям.

В настоящее время на российском рынке средств мониторинга представлено импортное оборудование для диагностики деформаций (например, оборудование швейцарской компании Leica Geosystems), которое имеет очень высокую стоимость при узко специализированном назначении. В данной статье рассмотрен методологический подход к разработке системы для непрерывного мониторинга деформаций гидротехнических сооружений, который заключается в применении в проектах комплекта следующего оборудования: микроконтроллеры семейства AVR (Amtel), современные электронные датчики (параметрические приборы измерения изменений физической величины в реальном масштабе времени), а также устройства беспроводной связи. Различные комбинации комплектов такого оборудования позволяют разрабатывать более дешевые измерительные комплексы и системы мониторинга с гибкой настройкой и возможностью их модификации в будущем.

Основными технологическими элементами системы мониторинга являются блоки измерения, несколько серверов сбора данных и главный сервер (обыкновенный персональный компьютер, подключенный к сети). В качестве платформы микроконтроллеров была выбрана Arduino [11] — аппаратная вычислительная платформа, основными компонентами которой являются простая плата ввода-вывода и среда разработки на языке Processing/Wiring (упрощенная версия C++) [10].

Arduino может использоваться как для создания автономных интерактивных объектов, так и подключаться к программному обеспечению, выполняемому на компьютере (например, Processing). Платформа Arduino успешно применяется в различных проектах, связанных с организацией непрерывного мониторинга различных физических параметров [8], [9].

Каждый измерительный блок (рис. 1) состоит из следующих компонентов:

- микроконтроллера на базе AVR ATmega328 (Arduino Nano 3.0);
- трехосевого цифрового акселерометра ADXL345;
- модуля беспроводной связи APC220-43, 455MHZ-418M (1K шаг).



Рис. 1. Структура измерительного блока

Сервер сбора данных (рис. 2) состоит из следующих компонентов:

- микроконтроллера на базе AVR ATmega328 (Arduino Uno);
- платы расширения Ethernet Shield;
- модуля беспроводной связи APC220-43, 455MHZ-418M (1K шаг).

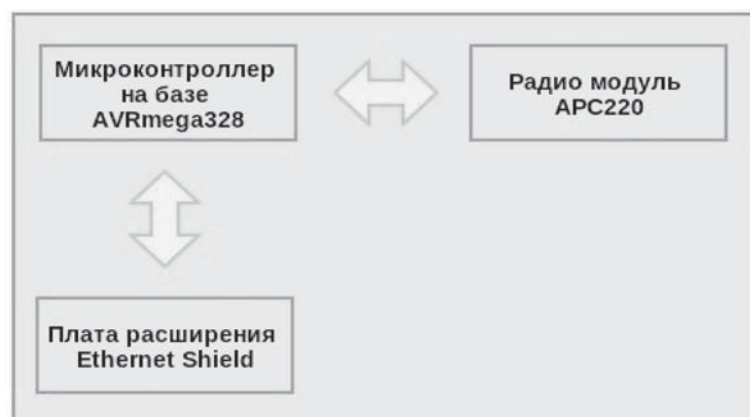


Рис. 2. Общее представление сервера сбора данных

Ethernet Shield — это плата расширения, которая устанавливается поверх самого Arduino. Она дает возможность выступать в качестве сетевого устройства (поддержка протокола TCP/IP) и общаться по проводной сети с аналогичными устройствами, обычными компьютерами, принтерами, сервисами в интернете и прочими сетевыми ресурсами. Каждый измерительный блок получает идентификационный номер и устанавливается (монтируется) строго в контрольных точках объекта мониторинга. Общее управление измерительным блоком осуществляет микроконтроллер ATmega328 (Arduino Nano 3.0), в который предварительно через usb-порт загружается программа — так называемый скетч (sketch). В заданный пользователем промежуток времени происходит обработка данных, поступающих от измерительных электронных датчиков. «Трехосевой» акселерометр (ADXL345) с высоким разрешением (13 бит) позволяет производить измерения ускорения (силы гравитации) по всем трем ортогональным осям с точностью отклонения не менее $\pm 0,1^\circ$ и диапазоном значений от $\pm 2g$ до $\pm 16g$ м/с².

Электронный акселерометр позволяет зафиксировать проекцию ускорения на три пространственные оси, то есть определить интенсивность перемещений, связанных с любыми механическими воздействиями.

Рабочий температурный диапазон измерительного блока составляет от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$ (допустимые предельные значения рабочих температур определяются в зависимости от типов применяемых в блоках системы компонентов). Питание может подаваться от внешнего источника либо от аккумулятора, что обеспечивает простоту использования, мобильность и надежность устройств системы. Работа системы может быть реализована как непрерывно, так и для периодических измерений.

На базе блоков организуется измерительная сеть (рис. 3), в которую могут входить до 30 устройств, обеспечивающих непрерывный мониторинг деформаций для каждой точки в автоматическом режиме.

При работе системы в режиме периодических измерений все данные, получаемые от отдельных измерительных блоков посредством радиосвязи, передаются на серверы сбора данных для организации их хранения (запись данных производится на SD-карту) до тех пор, пока главный сервер не обратится к ним. В случае непрерывного мониторинга серверы сбора данных ретранслируют данные по протоколу TCP/IP на главный сервер, где они обрабатываются и анализируются по специально разработанным алгоритмам.

Для оперативного реагирования на изменение текущего состояния величины основных контролируемых параметров объекта в измерительной системе предусматривается возможность контрольно-предупредительной сигнализации, которая оперативно информирует центр управления объектом о резком изменении величины контролируемых параметров или о недоступности измерительного блока (его произвольном отключении).

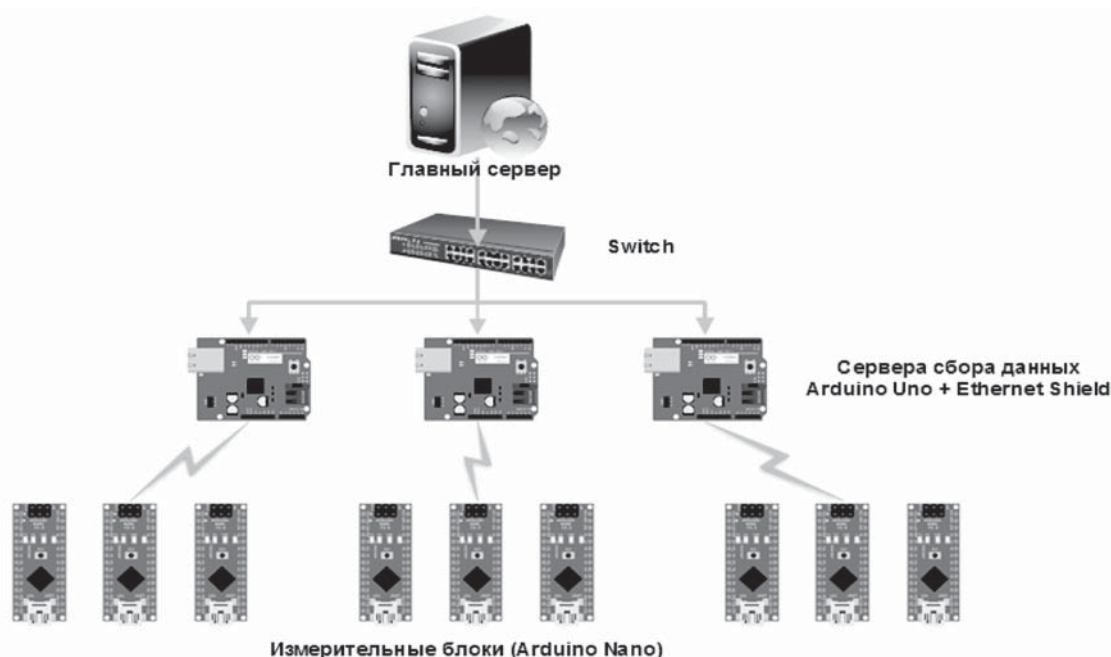


Рис. 3. Сетевая структура измерительных блоков, обеспечивающая сбор и хранение данных на сервере

Информация о состоянии объекта каждый раз при актуализации оценивается по некоторому множеству критериев. Нахождение значений критерия в некотором интервале позволяет сделать вывод о состоянии сооружения. Критериев может быть несколько и желательно их свести в некоторый интегральный вид. Предполагается, что критерии изменяются приблизительно в одном

диапазоне, что однако не всегда возможно на практике — необходима нормализация значений. В качестве одного из возможных подходов предложим следующую функцию состояния.

Оценочная функция принимает значение только в области положительных чисел и имеет два интервала монотонности. Функция показывает относительное приближение значения переменной к некоторому базовому интервалу. Вне промежутка допустимых значений скорость изменения функции меньше, чем в области допустимых значений.

На основании использования данной оценочной функции можно ввести интегральные оценки состояния для нескольких критериальных переменных и ряда моментов времени:

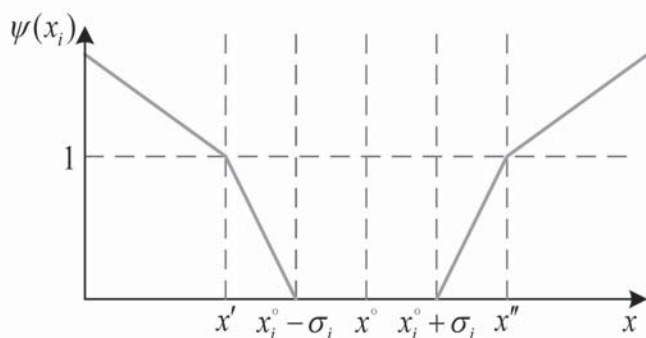


Рис. 4. Вид функции $\Psi(x_i)$

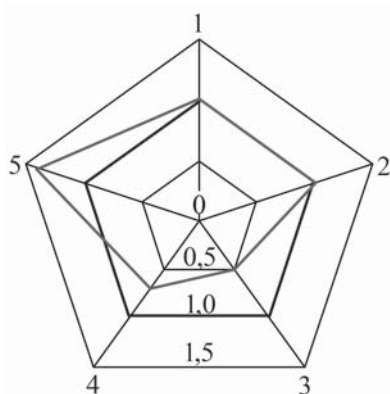


Рис. 5. Отображение состояния в некоторый момент времени

$\psi(t) = \max(\psi(x_i))$ — оценка состояния для шага t для множества i -х критериальных переменных; $\psi(i) = \max(\psi(x_i))$ — оценка траектории i -й переменной во времени t ; $\psi = \max(\psi(t)) = \max(\psi(i))$ — оценка траектории для заданного числа шагов и заданного множества критериальных переменных. При этом:

$\psi(t) \in [0, 1]$ — допустимое состояние объекта для шага моделирования t ;

$\psi(t) = 0$ — оптимальное состояние объекта для шага моделирования t ;

$\psi(i) \in [0, 1]$ — допустимая траектория переменной для заданного числа шагов;

$\psi(i) = 0$ — оптимальная траектория переменной для заданного числа шагов;

$\psi \in [0, 1]$ — допустимая траектория объекта для заданного числа шагов для заданного множества критериальных переменных;

$\psi = 0$ — оптимальная траектория объекта для заданного числа шагов для заданного множества критериальных переменных.

Оценку технического состояния объекта на одном моменте времени лучше всего иллюстрировать звездчатой диаграммой (рис. 5).

На рис. 5 показаны «единичная» область допустимых значений и критериальная переменная, для которой значения вышли за область допустимых. Значение функции $\psi(i)$ будет соответствовать наибольшему лучу диаграммы.

Оценку траектории переменной можно проиллюстрировать на графике зависимости $\psi(x) = f(t)$ (рис. 6), где отмечена

единичная граница допустимых значений. Значение функции $\psi(t)$ будет соответствовать наибольшей ординате графика.

Число градаций функции может быть увеличено. Рассмотрим сначала это на примере. Пусть $\psi(x_i)$ имеет три градации, для наглядности возьмем значения $\{1; 0,5; 0\}$. Тогда из известного в аналитической геометрии уравнения прямой,

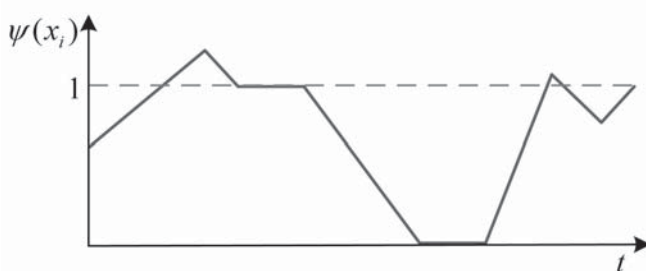


Рис. 6. Отображение траектории переменной

определяемой двумя точками $\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$, получим соотношение, которое будет соответствовать изменению функции в промежутках ее значений $[1; 0,5]$ и $[0,5; 0]$ слева и справа от оптимальной окрестности (или в соответствующих интервалах монотонности):

— для случая слева от оптимальной окрестности:

$$-0,5 * \frac{x_i - x_i^1}{x_i^1 - x_i} + 1, \text{ для } x_i^1 \leq x_i \leq x_i^1; -0,5 * \frac{(x_i^o - \sigma_i) - x_i}{(x_i^o - \sigma_i) - x_i^1} + 0,5, \text{ для } -x_i^1 \leq x_i \leq x_i^o - \sigma_i$$

для случая справа от оптимальной окрестности:

$$-0,5 * \frac{x_i^2 - x_i}{x_i^2 - x_i^1} + 1, \text{ для } x_i^2 \leq x_i \leq x_i^2; -0,5 * \frac{x_i - (x_i^o + \sigma_i)}{x_i^2 - (x_i^o + \sigma_i)} + 0,5, \text{ для } x_i^o + \sigma_i \leq x_i \leq x_i^2,$$

где x_i^1 — нижняя граница значений введенного интервала переменных; x_i^2 — верхняя граница значений введенного интервала переменных.

В рассматриваемом случае 0,5 — это значения функции ψ , в точках x_i^1 и x_i^2 они равны. Если продолжить данный процесс, то в силу определения вводимой функции значения функций на концах интервалов будут равны, а значения функций на границах соседних интервалов (вложенных), исходя из тех же формул аналитической геометрии, будут:

— для левого интервала монотонности:

$$-\varphi(x_i^{j+1}) * \frac{x_i - x_i^j}{x_i^{j+1} - x_i^j} + \varphi(x_i^j), \text{ для } x_i^j \leq x_i \leq x_i^{j+1};$$

для правого интервала монотонности:

$$-\varphi(x_i^{j+1}) * \frac{x_i^j - x_i}{x_i^j - x_i^{j+1}} + \varphi(x_i^j), \text{ для } x_i^{j+1} \leq x_i \leq x_i^j,$$

где x_i^{j+1} — граница значений внутреннего (вложенного) интервала значений (минимальное значение — в левом интервале монотонности, максимальное — в правом); x_i^j — граница значений внешнего (поглощающего) интервала значений (минимальное значение — в левом интервале монотонности, максимальное — в правом).

Заметим, что если все промежутки между границами соседних вложенных интервалов функции ψ будут равны между собой, то они расположатся на прямой (см. рис. 6).

Приведенные оценки позволяют судить о степени приближения поведения модели (объекта) к эталонному состоянию. Данная оценочная функция может быть применена, например, к оценке состояния причальной стенки по перемещениям ее оголовка или определению допустимой эксплуатационной нагрузки по перемещениям стенки, анкерной опоры и напряжениям в анкерных тросах.

Выводы

Рассмотрен прототип автоматизированной системы для непрерывного мониторинга деформаций гидротехнических строительных конструкций и сигнализации о недопустимых изменениях величины контролируемых параметров и принципы оценки критериальных переменных. Основными преимуществами разрабатываемого измерительного комплекса являются его минимальные размеры, низкое энергопотребление, а также предусмотренная конструкцией возможность его программной и аппаратной модификации в будущем.

Список литературы

1. Балонин Н. А. Новые информационные технологии мониторинга гидротехнических сооружений / Н. А. Балонин, П. А. Гарибин, В. Е. Марлей // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — №4. — С. 150–154.

2. Балонин Н. А. Перспективы использования информационных технологий для мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений / Н. А. Балонин, П. А. Гарибин, В. Е. Марлей и др. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2010. — № 93. — С. 171–176.
3. Гарибин П. А. Обеспечение контролеспособности сооружений — один из этапов построения прогнозных моделей / П. А. Гарибин, В. Е. Марлей, Г. Г. Рябов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 1. — С. 8–14.
4. Гарибин П. А. Разработка автоматизированной системы для непрерывного контроля технического состояния гидротехнических сооружений / П. А. Гарибин, В. Е. Марлей, Е. О. Ольховик, С. В. Шабанов // Гидротехника XXI ВЕК — 2013. — № 2 (14). — С. 50–53.
5. Устинов А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений / А. В. Устинов // Гидротехническое строительство. — 2014. — № 6. — С. 39–43.
6. Арифудин Е. З. Методология мониторинга чрезвычайных ситуаций, связанных с авариями на гидротехнических сооружениях / Е. З. Арифудин, В. И. Федянин, А. С. Мальцев и др. // Вестник воронежского института ГПС МЧС России. — 2013. — № 2(7). — С. 28–35.
7. Малько А. В. Организация мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений Светлинской ГЭС (Вилуйской ГЭС-3) / А. В. Малько и др. // Гидротехническое строительство. — 2012. — № 12. — С. 2–10.
8. Лазаренко М. Л. Система мониторинга и управления температурой в климатической камере / М. Л. Лазаренко, Л. М. Лазаренко // Международный технико-экономический журнал. — 2014. — № 5. — С. 67–71.
9. Гаврильев А. Л. Использование аппаратной вычислительной платформы «Arduino» для удаленного мониторинга блок-боксов / А. Л. Гаврильев, Д. Ю. Берчук, Д. В. Журавлев // Сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». — Томск: Нац. исслед. Томский политехнический университет, 2013. — С. 229–231.
10. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino. / У. Соммер. — СПб.: Изд.: БХВ-Петербург, 2012. 256 с.
11. Ардуино, инструмент для проектирования электронных устройств. [Электронный ресурс] / Сайт производителя. Режим доступа: <http://arduino.ru>

УДК 004.056.5

А. В. Башмаков,
канд. техн. наук, доц.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОДХОДА К ПОСТРОЕНИЮ ЗАЩИЩЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

THE CHOICE OF THE OPTIMAL APPROACH TO BUILDING SECURE WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS

В статье рассмотрены основные подходы, применяемые при построении беспроводных локальных сетей, включающие экспериментальные методы исследования, аналитическое и имитационное моделирование. Указаны существующие частные «готовые» методологические (технологические) решения. Предложены группы внешних характеристик беспроводных локальных сетей для решения оптимизационных задач. В ходе выбора предпочтительной технологии беспроводной локальной сети рекомендовано использовать метод главного критерия. Представлен оптимальный вариант построения защищенной беспроводной сети, в котором в качестве целевой функции выступают показатели затрат, а остальные показатели (качество услуг, устойчивость к внешним воздействиям) являются ограничениями.