

## Метод обоснования рационального варианта пунктов мониторинга технического состояния инженерных систем уникальных зданий и сооружений

*К.т.н., доцент В.С. Солдатенко;  
к.т.н., начальник кафедры Метрологического обеспечения вооружения, военной и  
специальной техники В.Н. Харин,  
ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского»*

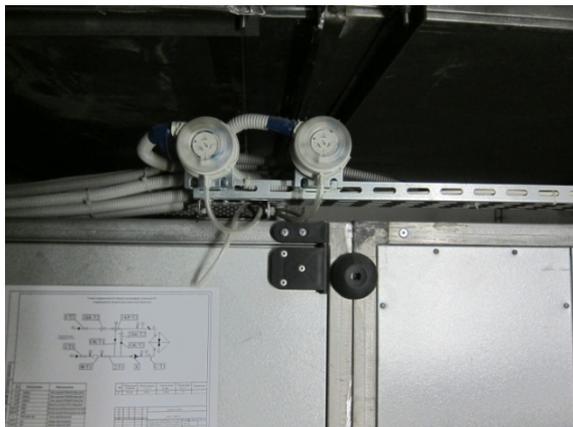
**Аннотация.** При обязательном мониторинге технического состояния несущих конструкций уникальных зданий и сооружений необходимо также проведение аналогичных мероприятий для объектов их инженерных систем. Для этого создаются пункты мониторинга. Ставится задача выбора рационального состава средств измерений с учетом ресурсных ограничений и наличия нескольких критериев рациональности. Необходимо также учитывать условия существенной неопределенности проектирования и создания уникальных зданий и сооружений. Это предполагает участие экспертов и использование для обработки результатов экспертизы теории нечеткой логики.

В статье рассматривается подход к формированию рационального варианта приборного состава пункта мониторинга на основе анализа интегральной эффективности используемых методик измерений для контроля технического состояния инженерных систем. Предложен способ перехода от частных показателей эффективности средств контроля к показателям интегральной эффективности пункта мониторинга на основе модели базы знаний в форме продукционных правил вывода. Такой подход позволяет определять наиболее эффективную измерительную методику для каждого объекта уникального здания по совокупности отдельных показателей, которые оцениваются экспертами. Полученные результаты позволяют существенно снизить стоимость решения задачи обоснования приборной базы пунктов мониторинга статистическими методами за счет отказа от длительных натурных испытаний.

**Ключевые слова:** техническое состояние инженерных систем; измерительная методика; лингвистическая переменная; база знаний; продукционное правило

### Введение

Для уникальных зданий и сооружений наряду с обязательным мониторингом технического состояния несущих конструкций [1] необходимо также проведение аналогичных мероприятий для объектов инженерных систем. Одним из новых направлений решения указанной проблемы является дополнение известных методов контроля [1–6] общего назначения применением специализированного оборудования (рис. 1, 2) неразрушающего контроля и диагностирования объектов [4, 5, 6].



**Рисунок 1. Манометры для контроля загрязненности воздушных фильтров**



**Рисунок 2. Приборы контроля работоспособности калорифера (термометры, манометры)**

Это позволяет реализовать комплексное экспресс-тестирование и оценивание технического состояния инженерных систем исследуемого здания (сооружения).

Солдатенко В.С., Харин В.Н. Метод обоснования рационального варианта пунктов мониторинга технического состояния инженерных систем уникальных зданий и сооружений

Указанный подход может быть реализован в форме внедрения модульных многофункциональных комплексов средств измерения и диагностирования, которые представляют собой стационарные или мобильные пункты мониторинга уникальных зданий и сооружений. Однако в настоящее время отсутствуют утвержденные нормативными документами методы обоснования состава приборной базы этих объектов. Поэтому формирование приборной базы пунктов мониторинга для уникальных зданий и сооружений в условиях финансовых и иных ограничений представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Известные методы, которые применяются для формирования состава пунктов мониторинга уникальных зданий и сооружений, разделим на три группы [7–12]. К первой из них относятся подходы, базирующиеся на использовании знаний и интуиции специалистов. Наиболее часто используются следующие методы: «мозговой атаки», сценариев, экспертных оценок (включая SWOT-анализ), Дельфи, «дерева целей», морфологического анализа и ряд других. Во вторую группу можно включить методы формализованного представления пунктов мониторинга (формального моделирования исследуемых процессов). Речь в данном случае идет об описании исследуемых сложных технических систем с помощью математических, экономико-математических методов и моделей их исследования. Эти методы опираются на аналитические, статистические, теоретико-множественные, лингвистические и семиотические, а также графические описания процедур диагностирования оборудования. Третью группу способов обоснования состава пунктов мониторинга представляют так называемые комплексированные методы. Их основой является математический аппарат комбинаторики, ситуационного моделирования, топологии, графосемиотики и др. Свое название они получили от объединения экспертных и формализованных методов.

Анализ особенностей перечисленных методов привел к следующему выводу. Задаче формирования приборной базы пунктов мониторинга для уникальных зданий и сооружений в наибольшей мере отвечают методы, базирующиеся на использовании лингвистических (нечетких) конструкций. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, для данного типа объектов характерна неопределенность их технического состояния, уменьшить которую можно с помощью нечеткой логики. Во-вторых, имеется некоторая исходная информация о свойствах предполагаемых для использования в составе пункта мониторинга средств измерений. Эти сведения можно дополнить экспертными заключениями об ожидаемом уровне эффективности анализируемых измерительных методик. В-третьих, в рамках второй группы методов исследования нецелесообразно применение статистических подходов к решению задачи. Стоимость необходимых экспериментов при этом может быть слишком велика для малосерийных и уникальных зданий и сооружений. В-четвертых, использование комбинационных методов последней группы приводит к необоснованному усложнению расчетных процедур и интерпретации получаемых результатов моделирования. В-пятых, применение лингвистических моделей позволяет осуществлять на строго научной основе выбор рационального варианта приборной базы с учетом нескольких критериев предпочтительности. Основным отличием этих моделей от известных подходов является применение сравнительного анализа эффективности методик измерения параметров состояния объектов при принятии решения.

Для обоснования рационального варианта состава пункта мониторинга технического состояния инженерных систем зданий и сооружений в настоящей статье предложено использовать модель знаний в форме продукционных правил перехода от частных показателей эффективности отдельных измерительных методик к формированию комплексного заключения об эффективности приборной базы в целом. Решение указанной задачи включает три последовательных этапа:

- 1) формирование совокупности показателей предпочтительности вариантов приборной базы контроля технического состояния инженерных систем уникального здания (сооружения);
- 2) определение множества потенциально пригодных для определения технического состояния инженерных систем уникального здания (сооружения) методик измерений;
- 3) обоснование рационального варианта структуры приборной базы контроля технического состояния инженерных систем на основе применения модели знаний о влиянии частных показателей отдельных измерительных методик на итоговое заключение о составе средств измерений.

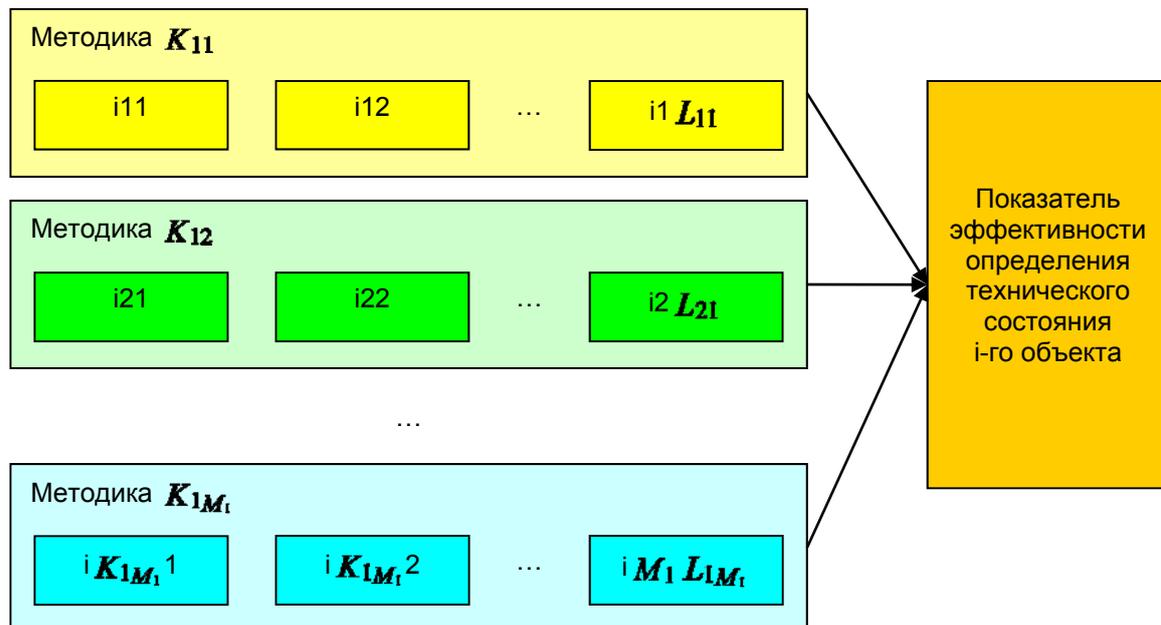
Рассмотрим решение описанной задачи на основе применения аппарата нечеткой логики [13–17].

### Математическая постановка задачи

Предположим, что между фактом определения технического состояния конкретного объекта – инженерной системы уникального здания (сооружения) – и результатами измерений его параметров состояния с помощью средств контроля, применяемых при измерительной методике, существует некоторая взаимосвязь. Характер указанной связи определяют эксперты на основе имеющихся у них опыта и знаний. При этом свое мнение они выражают в терминах естественного языка.

Необходимо на основе полученных высказываний специалистов построить математическую модель, позволяющую выявлять причинно-следственные связи между фактом определения технического состояния и результатами измерений параметров, выполненных с помощью средств контроля пункта мониторинга, которые влияют на это событие. Результаты такого моделирования должны быть применимы для принятия решений по составу средств измерений и использованию измерительных методик для определения технического состояния обследуемых объектов уникального здания (сооружения). Рассмотрим математическую постановку указанной задачи.

Пусть число объектов инженерных систем уникального здания (сооружения) равно  $N$ . Техническое состояние каждого  $i$ -го из  $N$  объектов может определяться с помощью  $K_{ij}$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M_i$ ) измерительных методик, использование каждой из которых подразумевает наличие  $n_{ijk}$  ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M_i, k = 1(1)L_{ij}$ ) средств измерений. Через  $M_i$  ( $i = 1(1)N$ ) обозначается число типов измерительных методик для  $i$ -го объекта; через  $L_{ij}$  – число средств измерений, необходимых для реализации  $j$ -й измерительной методики ( $i = 1(1)N, j = 1(1)M_i$ ). Введенное описание иллюстрируется схемой на рисунке 3, где в обозначениях средств контроля указаны значения их индексов.



**Рисунок 3. Характер влияния частных показателей эффективности измерительных методик на комплексный показатель эффективности определения технического состояния объекта**

Будем полагать, что каждая измерительная методика характеризуется несколькими свойствами эффективности ее применения. К таким свойствам, например, могут относиться оперативность контроля; стоимость реализации методики; результативность контроля объекта инженерной системы [18–22]. Пусть для перечисленных характеристик применительно к  $i$ -му объекту инженерной системы используются следующие показатели эффективности применения  $j$ -й методики: оперативность оценивается средней длительностью  $t_{ij}$  контроля технического состояния объекта; показателем стоимости выступает средняя величина затрат  $c_{ij}$  на

формирование и реализацию измерительной методики; вероятность  $p_{ij}$  правильного определения технического состояния контролируемого объекта – для результативности контроля ( $j = (1(1)K_i, i = 1(1)N$ ). В силу уникальности здания указанные показатели будем рассматривать как нечеткие величины  $\underline{t}_{ij}$ ,  $\underline{c}_{ij}$  и  $\underline{p}_{ij}$  ( $j = (1(1)K_i, i = 1(1)N$ ). В соответствии с правилами нечеткой логики описание показателей имеет следующий вид [23]:

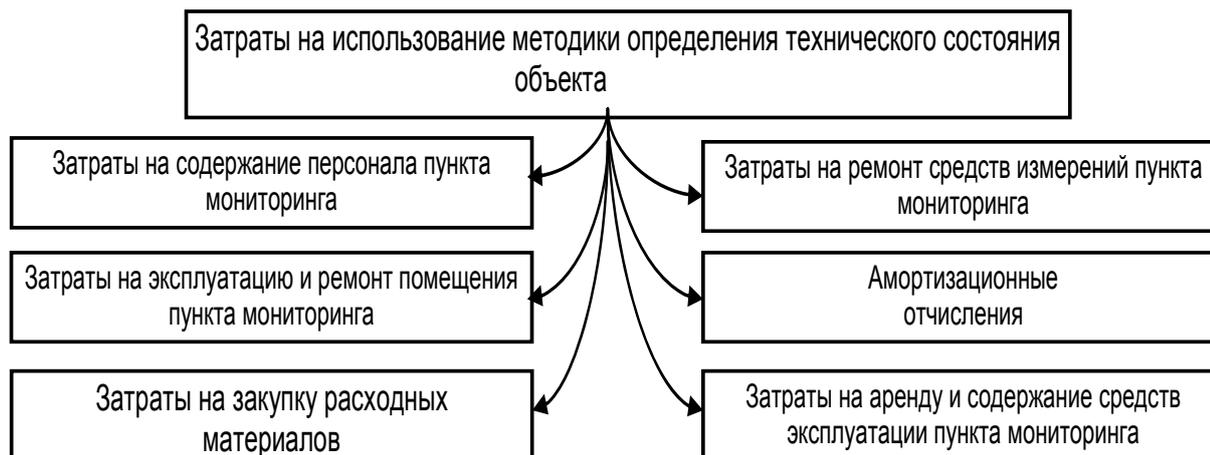
$$\underline{t}_{ij} = \{ \langle t_{ij}, \mu_{\underline{t}_{ij}}(t_{ij}) \rangle \}, \quad j = (1(1)K_i, i = 1(1)N); \quad (1)$$

$$\underline{c}_{ij} = \{ \langle c_{ij}, \mu_{\underline{c}_{ij}}(c_{ij}) \rangle \}, \quad j = (1(1)K_i, i = 1(1)N); \quad (2)$$

$$\underline{p}_{ij} = \{ \langle p_{ij}, \mu_{\underline{p}_{ij}}(p_{ij}) \rangle \}, \quad j = (1(1)K_i, i = 1(1)N), \quad (3)$$

где символом  $\mu$  обозначена функция принадлежности (ФП) соответствующей нечеткой величины.

Рассмотрим структуру каждого из показателей (1)–(3). Показатель оперативности контроля  $t_{ij}$  может включать среднее времени подготовки объекта к проведению контроля; среднее времени измерения; среднее времени обработки результатов контроля технического состояния  $i$ -го объекта с помощью  $j$ -й измерительной методики ( $j = (1(1)K_i, i = 1(1)N$ ). Структуру затрат  $c_{ij}$  на формирование и реализацию  $j$ -й методики для  $i$ -го объекта ( $j = (1(1)K_i, i = 1(1)N$ ) можно представить схемой (рис. 4).



**Рисунок 4. Затраты на использование методики измерений**

Показатель результативности  $p_{ij}$  [20, 22] отражает ожидаемые значения показателей полноты и достоверности контроля параметров технического состояния объектов. На вероятность правильного определения технического состояния влияют особенности методики измерений, а также условия проведения измерений.

Введем обобщенные показатели эффективности определения технического состояния  $i$ -го объекта для всей совокупности измерительных методик:  $\underline{T}_i$  – показатель оперативности;  $\underline{C}_i$  – показатель стоимости (ресурсоемкости);  $\underline{P}_i$  – показатель результативности контроля. Эти показатели имеют нечеткую природу, поскольку определяются с помощью нечетких значений аналогичных частных показателей измерительных методик для рассматриваемого объекта.

Установим нечеткие отношения между элементами нечетких множеств  $\underline{t}_{ij}$ ,  $\underline{c}_{ij}$ ,  $\underline{p}_{ij}$  и множествами  $\underline{T}_i$ ,  $\underline{C}_i$  и  $\underline{P}_i$  ( $j = (1(1)K_i, i = 1(1)N$ ).

$$\underline{T}_i = \underline{t} * R_t; \quad (4)$$

$$\underline{C}_i = \underline{c} * R_C; \quad (5)$$

$$\underline{P}_i = \underline{p} * R_p, \quad (6)$$

где символом \* обозначается применение правила композиции нечеткого вывода [17, 20]; матрицы  $\underline{t}$ ,  $\underline{c}$  и  $\underline{p}$  – матрицы нечетких значений соответствующих частных показателей эффективности измерительных методик по отношению к средствам контроля, используемым в составе этих методик; матрицы  $R_t$ ,  $R_C$ ,  $R_p$  – матрицы нечетких отношений между элементами множеств частных и обобщенных показателей эффективности измерительных методик.

Для получения нечетких значений показателей эффективности  $\underline{T}_i$ ,  $\underline{C}_i$  и  $\underline{P}_i$  ( $i = 1(1)N$ ) необходимо наличие базы знаний [23–25], позволяющей сформировать соотношения (4)–(6).

Рассмотрим, как представить модель знаний для описания взаимосвязи между частными и обобщенными показателями эффективности измерительных методик.

### *Модель знаний для формирования значений показателей эффективности*

Рассмотрим модель знаний для формирования совокупности потенциально пригодных средств контроля в форме продукционных правил вывода. Будем исходить из того, что значения каждой из нечетких переменных  $\underline{t}_{ij}$ ,  $\underline{c}_{ij}$ ,  $\underline{p}_{ij}$  для измерительной методики формируются на основе соответствующих частных показателей эффективности  $\underline{\tau}_{ijk}$ ,  $\underline{\sigma}_{ijk}$  и  $\underline{\pi}_{ijk}$  каждого из средств контроля, входящих в ее состав ( $i = 1(1)N$ ,  $j = 1(1)K_i$ ,  $k = 1(1)L_{ij}$ ), как это представлено на схеме (рис. 3).

Осуществим формализованное представление экспертных знаний в виде системы правил нечеткой логики. Это позволяет сопоставить значения частных показателей  $\underline{\tau}_{ijk}$ ,  $\underline{\sigma}_{ijk}$  и  $\underline{\pi}_{ijk}$  средств контроля значениям показателей измерительных методик  $\underline{t}_{ij}$ ,  $\underline{c}_{ij}$ ,  $\underline{p}_{ij}$  по каждому контролируемому объекту инженерной системы. Задачу можно решить на основе формирования и последующего использования нечеткой базы знаний – носителя экспертной информации о предполагаемой эффективности измерительных методик для определения технического состояния контролируемых объектов.

Представим показатели  $\underline{\tau}_{ijk}$ ,  $\underline{\sigma}_{ijk}$  и  $\underline{\pi}_{ijk}$  как лингвистические переменные с некоторым множеством термов. Термы должны соответствовать уровням частной эффективности выполнения контроля [26, 27]. Каждый терм соответствующей лингвистической переменной конкретного средства контроля имеет свою функцию принадлежности. Установим для уменьшения размерности задачи, что число термов для рассматриваемых лингвистических переменных одинаково и равно  $H$ . Например, нечеткая переменная  $\underline{\tau}_{ijk}$  может описываться лингвистической переменной вида «оперативность контроля  $i$ -го объекта с помощью средства номер  $k$  в составе измерительной методики номер  $j$ ». Термы лингвистической переменной  $\underline{\tau}_{ijk}$  в этом случае представляют собой высказывания «низкий уровень оперативности», «средний уровень оперативности» и т. д. Каждому  $l$ -му терму лингвистической переменной  $\underline{\tau}_{ijk}$  соответствует функция принадлежности  $\mu_{\underline{\tau}_{ijk}}^{(l)}$  ( $l = 1(1)H$ ). Тогда нечеткая переменная  $\underline{t}_{ij}$  «оперативность контроля ТС  $i$ -го объекта с помощью измерительной методики номер  $j$ » имеет свою функцию принадлежности, формируемую на основе функции принадлежности каждого из средств контроля,

входящих в состав  $j$ -й измерительной методики. Для формирования указанной функции принадлежности будем использовать операцию импликации [24, 25]

$$\tau_{ijk} \rightarrow t_{ij} \text{ (если } \tau_{ijk}, \text{ то } t_{ij}). \quad (7)$$

В этой логической операции условием (антецедентом) выступает частный показатель эффективности средства контроля  $\tau_{ijk}$ , а заключением (консеквентом) – показатель эффективности  $t_{ij}$  применения измерительной методики в целом. Аналогичные логические построения должны быть выполнены и для остальных показателей эффективности.

Процедуру использования нечеткого логического вывода при использовании указанных продукционных правил для объекта уникального здания (сооружения) разделим на два этапа: обобщение и заключение. На этапе обобщения логического вывода следует определить степень принадлежности всего антецедента правила (для средств контроля, входящих в состав измерительной методики). Будем использовать оператор вычисления минимального значения степени принадлежности среди всех нечетких переменных  $\tau_{ijk}$ , которые формируют конкретное продукционное правило  $\tau_{ijk} \rightarrow t_{ij}$ . Это объясняется тем, что в данном случае используемые переменные  $\tau_{ijk}$  модели (6) объединяются логическим оператором И. К одному и тому же результату – величине показателя эффективности (в данном случае – оперативности) контроля технического состояния  $T_i$  ( $i=1(1)N$ ) – приводит выполнение  $K_i$  измерительных методик. Поэтому все продукционные правила объединены логической связкой ИЛИ. В этом случае необходимо применять оператор вычисления максимального значения степени принадлежности результата контроля среди всех продукционных правил [18, 24, 25].

Таким образом, на этапе заключения (логического вывода) будем вычислять значение консеквента  $T_i$  ( $i=1(1)N$ ). Исходными данными для этой процедуры служат значения степеней принадлежности антецедентов правил, полученные применительно к каждому из возможных результатов  $t_{ij}$  ( $i=1(1)N, j=1(1)K_i$ ). Результат нечеткого вывода при этом будет также нечетким. Он представляется соответствующим термом лингвистической переменной  $T_i$ . В данном случае следует применять правило выбора в качестве консеквента такого показателя  $t_{ij}$ , который имеет максимальное значение функции принадлежности. Таким образом, нечеткая база знаний для показателя  $T_i$  эффективности (оперативности) контроля для  $i$ -го объекта инженерной системы здания (сооружения) описывается с помощью операций  $\cup$  (ИЛИ) и  $\cap$  (И) в следующей компактной форме [12, 18, 19]:

$$\bigcup_{j=1}^{K_i} \left[ \bigcap_{k=1}^{L_{ij}} (\tau_{ijk} = a_{ijk}^{(l)}) \right] \rightarrow T = T_i^{(m)}, \quad i=1(1)N, \quad (8)$$

где  $a_{ijk}^{(l)}$  –  $l$ -й терм нечеткой лингвистической переменной  $\tau_{ijk}$ ;  $T_i^{(m)}$  –  $m$ -й терм лингвистической переменной показателя оперативности контроля  $i$ -го объекта  $T_i$ .

Переход от нечеткой базы знаний к системе нечетких логических выражений  $T_i$  в соответствии с выражением (8) будем осуществлять с помощью расчетного соотношения

$$\mu_{T_i}^{(m)}(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{K_i}) = \bigvee_{j=1}^{K_i} \left( \bigwedge_{k=1}^{L_{ij}} (\mu_{\tau_{ijk}}^{(l)}) \right), \quad i=1(1)N, \quad (9)$$

где  $\mu_{T_i}^{(m)}(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{K_i})$  – функция принадлежности вектора значений термов показателя оперативности контроля технического состояния  $i$ -го объекта для решения  $T_i^{(m)}$  ( $i = 1(1)N$ ,  $m = 1(1)H$ );  $\mu_{\tau_{ijk}}^{(k)}$  – ФП переменной  $\tau_{ijk}$  для ее нечеткого термина  $a_{ijk}^{(l)}$  ( $i = 1(1)N$ ;  $j = 1(1)K_i$ ,  $k = 1(1)L_{ij}$ ,  $l = 1(1)H$ );  $\vee(\wedge)$  – операции максимизации (минимизации) соответствующих множеств значений рассматриваемых величин.

После того, как будут сформированы значения функции принадлежности вектора значений термов показателей эффективности контроля технического состояния по всем объектам инженерных систем здания, необходимо решить задачу выбора состава средств контроля для этого здания в целом. Рассмотрим применение описанной модели на расчетном примере.

### Расчетный пример

**Дано.**

Техническое состояние объекта инженерной системы уникального здания может быть определено с помощью двух различных измерительных методик. При использовании каждой методики применяются по три средства контроля. Критерием выбора методики является достижение максимальной оперативности контроля.

Для каждого из средств контроля, входящих в состав рассматриваемых измерительных методик, известны нечеткие экспертные оценки частных показателей эффективности (оперативности контроля). Эти нечеткие показатели рассматриваются как лингвистические переменные, имеющие по три терм-множества. Каждый терм имеет функцию принадлежности колоколообразной формы. Имеются также экспертные базы знаний, характеризующие влияние каждого из средств контроля на конечный результат, – определение технического состояния объекта по заданному показателю эффективности.

Исходные данные для одной измерительной методики и для используемого показателя эффективности контроля (оперативности) приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Исходные данные по функции принадлежности (ФП) термов**

Название термина	Обозначение термина	Параметры ФП термина		Максимально разрешенное значение показателя
		b	c	
Измерительная методика 1				
Средство контроля 1				
Малый уровень оперативности	МУО	4,000	1,000	3,000
Средний уровень оперативности	СУО	2,000	1,500	
Высокий уровень оперативности	ВУО	1,000	1,200	
Средство контроля 2				
Малый уровень оперативности	МУО	12,000	1,600	4,000
Средний уровень оперативности	СУО	9,000	1,400	
Высокий уровень оперативности	ВУО	3,000	1,200	
Средство контроля 3				
Малый уровень оперативности	МУО	18,000	3,5000	11,000
Средний уровень оперативности	СУО	12,000	4,000	
Высокий уровень оперативности	ВУО	8,000	3,000	

Экспертная база знаний для функции принадлежности измерительной методики 1 рассматриваемого объекта здания представлена в таблице 2.

Таблица 2. База знаний для измерительной методики 1 для объекта 1

№ п/п	Терм средства 1	Терм средства 2	Терм средства 3	Значение термина лингвистической переменной «показатель оперативности контроля для методики 1»
1	МУО	МУО	МУО	Малый уровень оперативности
2	МУО	СУО	МУО	
3	СУО	МУО	МУО	
4	МУО	МУО	СУО	
5	СУО	СУО	СУО	Средний уровень оперативности
6	МУО	СУО	СУО	
7	СУО	МУО	СУО	
8	ВУО	ВУО	ВУО	Высокий уровень оперативности
9	ВУО	ВУО	СУО	
10	СУО	ВУО	ВУО	

Аналогичным образом представляются исходные данные по измерительной методике 2.

**Необходимо:** определить, какая методика в наибольшей мере эффективна для контроля технического состояния каждого из рассматриваемых объектов по критерию максимальной оперативности.

#### Решение задачи.

В соответствии с заданными исходными данными выполним расчет значений функций принадлежности для каждого из средств контроля, используемых в методике 1. Вид функций принадлежности для термов частного показателя оперативности средства контроля 1 представлен на рисунке 5.

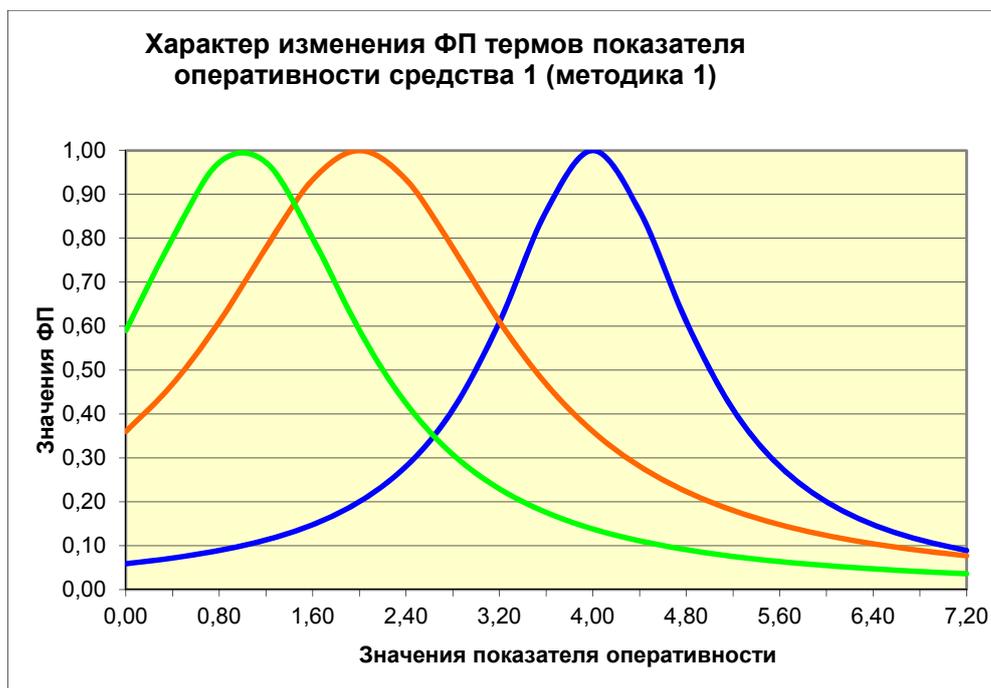


Рисунок 5. Расчетные значения ФП термов показателя оперативности средства 1 измерительной методики 1

Аналогичные расчеты выполняются для функций принадлежности термов других средств контроля, используемых в составе методики 1. Теперь необходимо определить значения функций принадлежности термов частных показателей оперативности для каждого из средств. При этом будем использовать предельно допустимые для них значения данного показателя (числовые данные правого столбца таблицы 1). Результаты расчетов для средств измерительной методики 1 приведены в таблице 3.

**Таблица 3. Расчетные значения функций принадлежности термов частных показателей оперативности контроля**

Название терма	Обозначение терма	Значение ФП терма
Средство контроля 1		
Малый уровень оперативности	МУО	0,500
Средний уровень оперативности	СУО	0,692
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,265
Средство контроля 2		
Малый уровень оперативности	МУО	0,038
Средний уровень оперативности	СУО	0,073
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,590
Средство контроля 3		
Малый уровень оперативности	МУО	0,200
Средний уровень оперативности	СУО	0,941
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,500

Расчетные значения для функций принадлежности базы знаний с учетом данных таблицы 3 приведены в таблице 4.

**Таблица 4. Численные показатели для базы знаний частных показателей оперативности контроля объекта**

№ п/п	методика 1 средство 1	методика 1 средство 2	методика 1 средство 3	Значение терма лингвистической переменной "показатель оперативности контроля для методики 1"	Значение ФП для терма показателя оперативности
1	0,500	0,038	0,200	0,038	0,07
2	0,500	0,073	0,200	0,073	
3	0,692	0,038	0,200	0,038	
4	0,500	0,038	0,073	0,038	
5	0,692	0,073	0,941	0,073	0,07
6	0,500	0,073	0,941	0,073	
7	0,692	0,038	0,941	0,038	
8	0,265	0,590	0,500	0,265	0,50
9	0,265	0,590	0,941	0,265	
10	0,692	0,590	0,500	0,500	

Из результатов таблицы 4 следует, что для измерительной методики 1 наиболее возможен результат «высокий уровень оперативности» при значении функции принадлежности для этого терма, равном 0,50. Пусть для второй измерительной методики аналогичным образом получаем терм-результат «средний уровень оперативности», для которого значение функции принадлежности равно 0,43. В соответствии с правилами нечеткой логики более предпочтительной для выбора является измерительная методика 1. В этом случае в состав приборной базы пункта мониторинга должны входить средства контроля технического состояния рассматриваемого объекта инженерной системы, которые необходимы для реализации измерительной методики 1.

### Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

На основе доступных, хотя и ограниченных сведений о парке анализируемых средств контроля возможно построение модели знаний в форме продукционных правил нечеткого вывода интегральных показателей эффективности измерительных методик приборной базы пункта мониторинга инженерных систем уникального здания. Исходными данными для базы знаний выступают частные показатели эффективности средств контроля, используемые в составе анализируемых измерительных методик. Это позволяет дополнить имеющиеся объективные

Солдатенко В.С., Харин В.Н. Метод обоснования рационального варианта пунктов мониторинга технического состояния инженерных систем уникальных зданий и сооружений

данные нечеткой информацией, отражающей знания и опыт экспертов в исследуемой предметной области. Такой подход позволяет существенно сократить объем дорогостоящих натуральных испытаний для определения состава приборной базы пунктов мониторинга.

Полученные результаты имеют ясный физический смысл и численную меру. Это позволяет обоснованно выбрать рациональную методику измерений и соответствующий ей состав измерительных приборов для контроля технического состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

### Заключение

1. Для формирования состава средств пункта мониторинга состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений наиболее применимо принятие решения на основе сравнения интегральной эффективности измерительных методик по заданным критериям (оперативности, стоимости, результативности контроля).

2. Малочисленность или уникальность проектов рассматриваемых зданий (сооружений) приводит к выводу о нецелесообразности проведения натуральных экспериментов в объеме, позволяющем использовать методы статистического анализа их результатов для определения состава приборной базы пунктов мониторинга, по причине высоких затрат времени и финансов.

3. Приемлемым подходом для решения задачи обоснования рационального состава средств измерений в пункте мониторинга является применение модели знаний в форме продукционных правил нечеткого вывода об интегральной эффективности измерительных методик для определения технического состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений на основе экспертных заключений о частных показателях эффективности указанных средств измерений.

4. Рациональность варианта приборной базы пункта мониторинга оценивается по нескольким критериям. Для принятия итогового решения сравниваются полученные расчетные значения функций принадлежности интегральной эффективности измерительной методики по каждому критерию. Это существенно упрощает процедуру получения конечного результата по нескольким критериям эффективности целевого применения пункта мониторинга объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

5. Рассмотренный подход к структурно-функциональному анализу пунктов мониторинга может найти практическое применение в деятельности компаний, осуществляющих мониторинг инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

### Литература

1. Положение об организации, проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания жилых зданий, объектов коммунального хозяйства и социально-культурного назначения (ВСН 58-88(р)). Приказ Госкомархитектуры Госстроя СССР №312 от 23.11.1988 г. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
2. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений
3. Методические рекомендации по определению технического состояния систем коммунальной инфраструктуры. Рекомендательное письмо Министерства регионального развития Российской Федерации от 26 апреля 2012 г. № 9905-АП/14.
4. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
5. Ватин Н.И., Улыбин А.В., Огородник В.М. ГОСТ Р 53778-2010: обследование инженерных сетей и другие особенности нового нормативного документа // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1. С. 5–7.
6. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник / Под ред. В.Д. Дмитриева, Б.Г. Мишукова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 338 с.
7. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интегрированная система морфологического анализа и синтеза концептуальных технических решений: монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2004. 220 с.
8. Батоврин В.К., Левин М.Ш. Использование метода морфологического проектирования в открытых информационных системах // Информационные технологии и вычислительные системы. 2005. №4. С. 47–54.

Солдатенко В.С., Харин В.Н. Метод обоснования рационального варианта пунктов мониторинга технического состояния инженерных систем уникальных зданий и сооружений

9. Костерин В.В., Оптимизация технических систем и устройств: Учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 1996. 187 с.
10. Levin M.Sh. Towards Combinatorial Analysis, Adaptation, and Planning of Human-Computer Systems // Applied Intelligence, 2002. Vol.16(3). Pp. 235–247.
11. Хубка В. Теория технических систем: Пер. с нем.. М.: Мир, 1987. 208 с.
12. Sgarbas K., Fakotakis N., Kokkinakis G. A Straightforward Approach to Morphological Analysis and Synthesis // Proc. COMLEX 2000, Workshop on Computational Lexicography and Multimedia Dictionaries, Kato Achaia, Greece, September 22-23, 2000. Pp. 31-34.
13. Солдатенко Т.Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5(23). С. 60–66.
14. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system // Sov. Techn. Rev. A, Energy. New York: Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. Pp. 1–31.
15. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2003. Vol. 18. Issue 6. Pp. 426–439.
16. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O., Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // In: Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. Pp. 401–412.
17. Адаменко А.Н. Системы искусственного интеллекта: Учебное пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 291 с.
18. Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 52–61.
19. Резервуары вертикальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности (Методические указания) / Российская ассоциация экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности «Росэкспертиза», «Научно-промышленный союз «РИСКОМ», НПК «Изотермик». М., 2009. 288 с.
20. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. 111 с.
21. Жуков Б.Н., Карпик А.П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов: Учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2006. 148 с.
22. Надежность и эффективность в технике: Справочник Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.
23. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
24. Асаи К., Ватада Д., Иван С. [и др.]. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. М.: Мир, 1993. 368 с.
25. Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Діагностування тріщин будівельних констркцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. 108 с.
26. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
27. Wang L.X., Mendel J.M., Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1992. Vol. 22. No. 6. Pp. 1414–1427.

*Владимир Стальевич Солдатенко, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(911)925-68-41; эл. почта: soldatenko\_vs@mail.ru*

*Виталий Николаевич Харин, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(911)219-25-32; эл. почта: kh.vet@rambler.ru*

© Солдатенко В.С., Харин В.Н., 2014

doi: 10.5862/MCE.46.6

## The method to justify rational variant points of monitoring technical condition of engineering systems in unique buildings and structures

**V.S. Soldatenko***Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg, Russia  
+7(911)9256841; e-mail: soldatenko\_vs@mail.ru***V.N. Kharin***Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg, Russia  
+7(911)2192532; e-mail: kh.vet@rambler.ru*

### Key words

technical condition of engineering systems; measuring technique; linguistic variable; knowledgebase; production inference rule

### Abstract

While necessarily monitoring technical condition of bearing designs of unique buildings and structures, the same monitoring must be done to the items of their engineering systems. To do so, certain monitoring points are designed. The objective here is to make choice among rational measurement instruments taking into account some resource restrictions and several rationality criteria. It is also necessary to consider great uncertainty conditions of design and creation of unique buildings and structures. This involves participation of experts, whereas the fuzzy logic theories are supposed to be applied in order to process examination results.

The article deals with an approach to designing some rational option for instrument structure of monitoring point, based on the analysis of integrated efficiency of the used measurement techniques to control technical condition of engineering systems. The way of transition from individual indicators of control devices' efficiency to integrated efficiency indicators of the point of monitoring has been proposed, basing on the knowledgebase model in the form of production inference rules. Such an approach allows identifying the most effective measuring technique for each object of a unique building by a complex of certain indicators estimated by experts. The obtained results may bring about a significant cost reduction when solving a problem of instrument base justification for statistical methods of monitoring at the expense of refusing from time-consuming natural tests.

### References

1. *Polozheniye ob organizatsii, provedenii rekonstruksii, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya zhilykh zdaniy, obyektov kommunalnogo khozyaystva i sotsialno-kulturnogo naznacheniya (VSN 58-88(r)) Prikaz Goskomarkhitektury Gosstroya SSSR №312 ot 23.11.1988g. GOST R 53778-2010 «Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya»* [Regulations on the organization, reconstruction, repair and maintenance of residential buildings, community facilities and social and cultural facilities VSN 58-88(r)) GOST 53778-2010 "Buildings and structures. Rules for inspection and technical state monitoring"]. (rus)
2. *SP 13-102-2003. Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Set of rules 13-102-2003. Rules for inspection of bearing structures of buildings]. (rus)
3. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu tekhnicheskogo sostoyaniya sistem kommunalnoy infrastruktury. Rekomendatelnoye pismo Ministerstva regionalnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii ot 26 aprelya 2012 g. № 9905-AP/14* [Guidelines on estimation of technical state of public infrastructure systems. Recommendation letter of the Ministry of Regional Development of Russian Federation of April 26, 2012 No. 9905-AP/14]. (rus)
4. Vavilov V.P. *Teplovyye metody nerazrushayushchego kontrolya: spravochnik* [Thermal methods of nondestructive testing: reference book]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1991. 240 p. (rus)
5. Vatin N.I., Ulybin A.V., Ogorodnik V.M. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 1. Pp. 5–7. (rus)
6. *Ekspluatatsiya sistem vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya: Spravochnik* [Operation of water supply, sewerage and gas: Reference book]. Edited by V.D. Dmitriyev, B.G. Mishukov. Leningrad: Stroyzdat, Lenigr. otd-niye, 1988. 338 p. (rus)

Soldatenko V.S., Kharin V.N. The method to justify rational variant points of monitoring technical condition of engineering systems in unique buildings and constructions

7. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Integrirovannaya sistema morfologicheskogo analiza i sinteza kontseptualnykh tekhnicheskikh resheniy: monografiya* [An integrated system of morphological analysis and synthesis of conceptual technical solutions: Monograph]. Volgograd: VolgGTU, 2004. 220 p. (rus)
8. Batovrin V.K., Levin M.Sh. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitelnyye sistemy*. 2005. No. 4. Pp. 47–54. (rus)
9. Kosterin V.V. *Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem i ustroystv: Ucheb. posobiye* [Optimization of technical systems and devices: Textbook]. Volgograd: VolgGTU, 1996. 187 p. (rus)
10. Levin M.Sh. Towards Combinatorial Analysis, Adaptation, and Planning of Human-Computer Systems. *Applied Intelligence*. 2002. Vol. 16(3). Pp. 235–247.
11. Khubka V. *Teoriya tekhnicheskikh sistem* [Theory of technical systems] Translated from German. Moscow: Mir, 1987. 208 p. (rus)
12. Sgarbas K., Fakotakis N., Kokkinakis G. A Straightforward Approach to Morphological Analysis and Synthesis. *Proc. COMLEX 2000, Workshop on Computational Lexicography and Multimedia Dictionaries, Kato Achaia, Greece, September 22–23, 2000*. Pp. 31–34.
13. Soldatenko T.N. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 5(23). Pp. 60–66. (rus)
14. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system. *Sov. Techn. Rev., A, Energy*. New York: Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. Pp. 1–31.
15. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2003. Vol. 18. Issue 6. Pp. 426–439.
16. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. In: *Zimmermann H.H.-J., Tsientis G., van Someren M., Dounias G. Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002. Pp. 401–412.
17. Adamenko A.N. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: uchebnoye posobiye* [Artificial intelligence systems: tutorial]. Saint-Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2013. 291 p. (rus)
18. Soldatenko T.N. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 7(25). Pp. 34–42. (rus)
19. *Rezervuary vertikalnyye svarnyye dlya nefti i nefteproduktov. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye i analiz bezopasnosti (Metodicheskiye ukazaniya)* [Welded vertical tanks for oil and oil products. Technical diagnostics and safety analysis (Guidelines)]. Rossiyskaya assotsiatsiya ekspertnykh organizatsiy tekhnogennykh ob'ektov povyshennoy opasnosti «Rosekspertiza», «Nauchno-promyshlennyy soyuz «RISKOM», NPK «Izotermik». Moscow, 2009. 288 p. (rus)
20. Konovalov N.N. *Normirovaniye defektov i dostovernost nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soyedineniy* [Rationing of defects and accuracy of nondestructive testing of welded connects]. Moscow: FGUP «NTTs «Promyshlennaya bezopasnost», 2006. 111 p. (rus)
21. Zhukov B.N., Karpik A.P. *Geodezicheskiy kontrol inzhenernykh ob'ektov promyshlennykh predpriyatiy i grazhdanskikh kompleksov: ucheb. posobiye* [Geodetic control of industrial engineering objects enterprises and civil complexes: Textbook]. Novosibirsk: SGGA, 2006. 148 p. (rus)
22. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: Spravochnik T. 10: Spravochnyye dannyye po usloviyam ekspluatatsii i kharakteristikam nadezhnosti* [Reliability and efficiency of the technique: Reference. Vol. 10: Reference data on conditions operating characteristics and reliability]. Edited by V.A. Kuznetsov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 336 p. (rus)
23. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatiye resheniy na osnove nechetkikh modeley: Primery ispolzovaniya* [Decision-making based on fuzzy models: examples of use]. Riga: Zinatne, 1990. 184 p. (rus)
24. Asai K., Vatada D., Ivan S. [et al]. *Prikladnyye nechetkiye sistemy* [Applied fuzzy systems]. Translated from Japanese. Moscow: Mir, 1993. 368 p. (rus)
25. Pankevich O.D., Shtovba S.D. *Diagnostuvannya trishchin budivelnykh konstrktsiy za dopomogoyu nechitkikh baz znan. Monografiya* [Diagnosing of structure cracks using fuzzy knowledge bases. Monograph]. Vinnitsya: UNIVERSUM – Vinnitsya, 2005. 108 p. (ukr)
26. Zade L. *Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [Concept of linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions]. Moscow: Mir, 1976. 166 p. (rus)
27. Wang L. X., Mendel J. M., Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1992. Vol. 22. No. 6. Pp. 1414–1427.

**Full text of this article in English: pp. 47–57**

Soldatenko V.S., Kharin V.N. The method to justify rational variant points of monitoring technical condition of engineering systems in unique buildings and constructions