



Министерство образования и науки Украины  
Запорожский национальный технический университет

# ***Метод формирования множества контролируемых параметров для программ испытаний сложных технических систем***

*Докладчик* – мл. науч. сотрудник кафедры программных средств  
Шитикова Елена Викторовна

*Руководитель* – к.т.н., профессор кафедры программных средств  
Табунщик Галина Владимировна

# Актуальность исследования



Рис.1 Агрегат газоперекачивающий  
ГПА-К/5,5-ГТП/6,3 СК

Проведение испытаний ГТУ НП и их узлов сопряжено с очень большими затратами. Поскольку избежать этих затрат невозможно, надо особое внимание уделить этапу планирования испытаний при этом повышая их информативность, т.е. увеличивать объем, точность, достоверность результатов и сведений, получаемых в результате проведения каждой экспериментальной работы.

**Испытательная деятельность** позволяют объективно установить соответствие показателей качества продукции требованиям нормативной документации, выявить фактические значения этих показателей, проверить, удовлетворяет ли продукция требованиям стандартов, сравнить качество изделий с качеством аналогов.

Эффективное управление всем процессом испытаний ГТУ НП в первую очередь зависит от рационального планирования всех работ и оптимального распределения ресурсов.



Рис.2 Газотурбинная электростанция  
«Мотор Сич ЭГ-6000»

## Актуальность исследования



Рис.3 Газотурбинная электростанция «ПАЭС 2500»  
на месте эксплуатации

В результате декомпозиции процесс создания программы испытаний может быть представлен как последовательность взаимосвязанных задач:

- идентификация объекта испытаний, определение цели и задач испытаний;
- определение порядка проведения испытаний и их обеспечения (распределение и использование материальных, временных и людских ресурсов);
- уточнение объема, последовательности и методик испытаний;
- описание порядка обработки полученных результатов;
- определение формы и порядка отчетности.



Рис.4 Газотурбинная электростанция  
«ПАЭС 2500»

## Постановка задачи

### Модель программы испытаний ГТУ НП

$$TP = \langle Obj; Goal; Verification; Controlled variable, Span \rangle \quad (1)$$

где *Obj* – множество, описывающее объект испытаний;

*Goal* – цель испытаний;

*Verification* – множество, описывающее проверки (работы), которые необходимо провести в процессе испытаний, которое может быть представлено кортежем:

$$Verification = \langle Work; Cost; Time \rangle, \quad (2)$$

где  $Work = \{work_1, \dots, work_n\}$  – подмножество, содержащее перечень (наименование) проверок (работ), где  $n$  - число работ;

$Cost = \{cost_1, \dots, cost_n\}$  – затраты на проведение соответствующих работ;

$Time = \{time_1, \dots, time_n\}$  – время на проведение работ;

$Controlled variable = \{cv_1, \dots, cv_m\}$  – множество контролируемых параметров, включающее как измеряемые контролируемые параметры ГТУ НП, так и расчетные, получаемые на основе измеряемых параметров, где  $m$  - количество параметров;

*Span* – диапазоны допустимых значений контролируемых параметров.

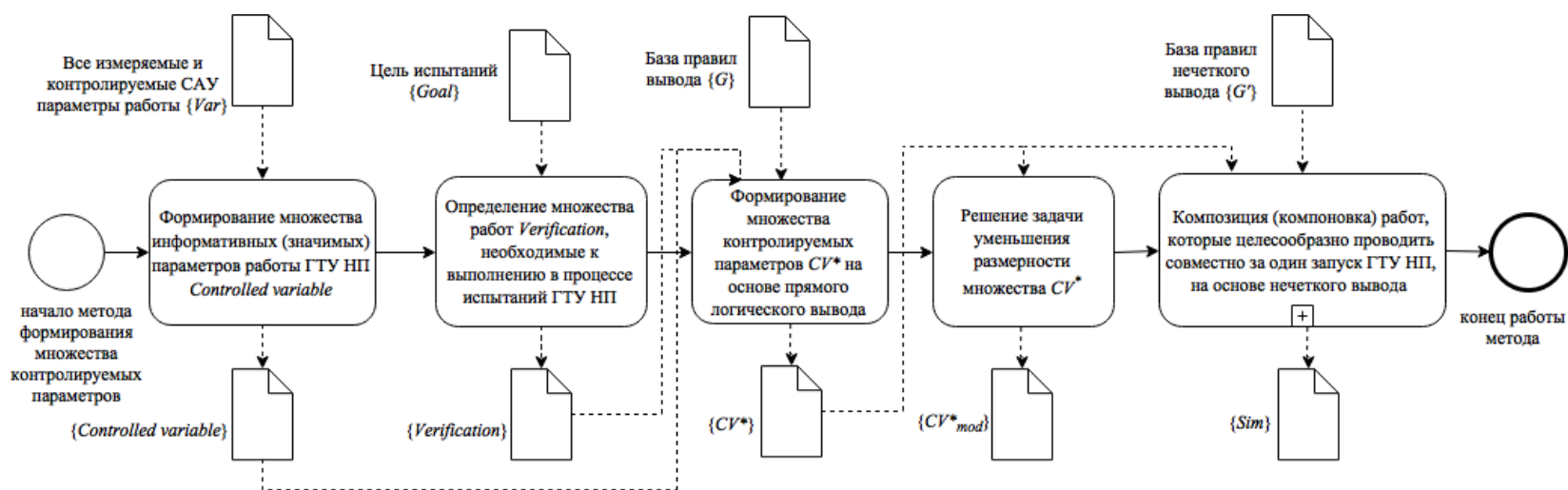
***Цель данной работы:***

разработка метода формирования множества контролируемых параметров для программ испытаний ГТУ НП.

***Задачи:***

- разработать метод формирования множества контролируемых параметров для программ испытаний ГТУ НП;
- определить множество работ, которые целесообразно проводить совместно.

## Метод формирования множества контролируемых параметров для программы испытаний ГТУ НП



## Метод формирования множества контролируемых параметров для программы испытаний ГТУ НП

На **первом этапе** формируется множество информативных (значимых) параметров работы ГТУ НП *Controlled variable*, которое будет включать как измеряемые, так и расчетные параметры работы ГТУ НП.

На **втором этапе** определяется перечень работ, которые необходимо выполнить в процессе испытаний ГТУ НП, для чего формируется множество *Verification = <Work; Cost; Time>*.

На **третьем этапе** для каждой из работ  $work_i$  подмножества *Work* необходимо поставить в соответствие подмножество  $CV_i^* \subseteq \text{Controlled variable}$ , которое бы включало достаточное количество контролируемых параметров, характеризующих эффективность работы исследуемого объекта (системы, агрегата, процесса и т.д.) во время испытаний.

С помощью системы прямого логического вывода (правило вывода *modus ponens*), используя базу правил вывода *G*, формируется отношение

$$R_{work \rightarrow CV} = \begin{matrix} & cv_1 & \cdots & cv_m \\ \begin{matrix} work_1 \\ \vdots \\ work_n \end{matrix} & \begin{vmatrix} \mu_{R_1}(work_1, cv_1) & \cdots & \mu_{R_1}(work_1, cv_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{R_1}(work_n, cv_1) & \cdots & \mu_{R_1}(work_n, cv_m) \end{vmatrix} & & \end{matrix}, \quad (3)$$

где  $\mu_{R_1}(work_n, cv_m)$  – характеристическая функция, принимающая значения 0 или 1 в зависимости от соответствия параметра  $cv_m$  рассматриваемой работе  $work_n$ .

Представим множество *Controlled variable* в виде вектора параметров работы ГТУ НП.

Тогда обобщающее множество параметров работы установки  $CV^*$ , которые необходимо контролировать при выполнении всех работ из подмножества *Work* можно представить в виде вектора подмножеств:

$$CV^* = \begin{pmatrix} CV_1^* \\ \vdots \\ CV_n^* \end{pmatrix} = R_{work \rightarrow CV} \cdot \begin{pmatrix} cv_1 \\ \vdots \\ cv_m \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $CV_i^* = \mu_{R_i}(work_i, cv_1) \cdot cv_1 + \dots + \mu_{R_i}(work_i, cv_m) \cdot cv_m$  - линейная комбинация, содержащая достаточное количество контролируемых параметров, характеризующих эффективность работы  $work_i$ .

## Метод формирования множества контролируемых параметров для программы испытаний ГТУ НП

На **четвертом этапе** решается задача уменьшения размерности множества  $CV^*$ . Обобщенное множество  $CV^*$  будет содержать повторяющиеся элементы, т.к. для различных работ могут быть использованы одни и те же параметры. Поэтому формируется множество  $CV_{mod}^*$  путем исключения повторяющихся элементов.

На **пятом этапе** проверяется целесообразность совместного проведения каждой работы из *Work* за один запуск ГТУ НП. Для этого определим множество *Sim*, содержащее степени схожести для всех возможных сочетаний пар подмножеств  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$ .

Попарные сравнения количества совпадающих элементов в подмножествах  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$  можно представить матрицей отношений  $A^{CV^*} = \{a_{ij}^{CV^*}\}$  при

$$a_{ij}^{CV^*} = \frac{\varepsilon}{\min(|CV_i^*|, |CV_j^*|)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - количество совпадающих элементов в паре сравниваемых подмножеств  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$ . При этом матрица  $A^{CV^*}$  будет симметрична относительно главной диагонали, поэтому достаточно представления только половины матрицы (например, верхнего треугольника матрицы).

Определение множества *Sim*, содержащее степени схожести подмножеств  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$  было выделено как отдельный Метод формирования объема работ для программы испытаний ГТУ НП.



## Метод формирования объема работ для программы испытаний ГТУ НП

Метод формирования объема работ для программы испытаний ГТУ НП основан на системы нечеткого вывода. Здесь можно выделить введение нечеткости (фаззификация, fuzzification) и непосредственно логический вывод. Этапы композиции (логической свертки) и приведения к четкости (дефаззификация, defuzzification), которые обычно присутствуют в системах нечеткого вывода, в нашем случае не требуются, т.к. показатель  $Sim$ , получаемый на выходе системы, является вектором частных степеней схожести  $Sim_{ij}$ , выраженных лингвистическими переменными, для всех возможных сочетаний пар подмножеств  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$ .

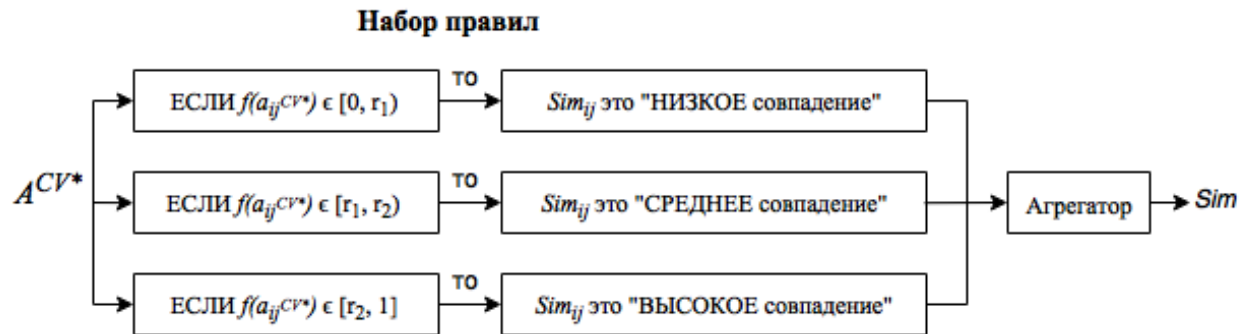


Рис.5 Организация вывода в нечеткой системе с использованием нескольких правил вывода

## **Метод формирования объема работ для программы испытаний ГТУ НП**

**Этап 1.** Для введения нечеткости определим соотношение количества совпадающих элементов для всех возможных сочетаний пар подмножеств  $CV_i^*$  и  $CV_j^* \subseteq CV^*$  с помощью нечетких термов

$$T(CV^*) = (\text{низкое совпадение, среднее совпадение, высокое совпадение}) \quad (6)$$

Далее для каждого определенного элемента матрицы  $a_{ij}^{CV^*}$  из верхнего треугольника экспертными методами задаются  $\mu_A(a_{ij}^{CV^*}) \in [0, 1]$  функции принадлежности нечетким термам  $T(CV^*)$ . Таким образом, будет сформирована векторная функция принадлежности  $\{\mu_A(a_{12}^{CV^*}), \mu_A(a_{13}^{CV^*}), \dots, \mu_A(a_{1n}^{CV^*}), \mu_A(a_{23}^{CV^*}), \dots, \mu_A(a_{2n}^{CV^*}), \dots, \mu_A(a_{(n-1)n}^{CV^*})\}$ . Количество элементов данного вектора можно определить как количество сочетаний пар всех подмножеств из обобщающего множества  $CV^*$ :

$$n^* = C_n^2 = \frac{n!}{2(n-2)!} \quad (7)$$

**Этап 2.** Логический вывод осуществляется с использованием базы правил нечеткого вывода  $G'$ .

В системе предусмотрен блок агрегирования, формирующий на выходе системы вектор  $Sim$ , состоящий из частных степеней схожести  $Sim_{ij}$ , полученных в результате применения базы правил нечеткого вывода.

Исходя из лингвистических значений  $Sim_{ij}$  все работы, для которых контролируемые параметры, содержащиеся в подмножествах  $CV_i^*$  и  $CV_j^*$ , имеют «высокое совпадение», рекомендуются к проведению за один запуск ГТУ НП.

Композиция работ с условием минимизации количества запусков в конечном счете приведет к уменьшению материальных и нематериальных затрат на проведение испытаний.

## **Применение метода формирования множества контролируемых параметров для программы испытаний ГТУ НП**

Данный метод был опробован при создании программы приемо-сдаточных испытаний газотурбинной электростанции ЭГ-6000, производства АО «МОТОР СИЧ».

Количество контролируемых САУ входных и выходных аналоговых и дискретных сигналов составляет порядка 500 штук (это сигналы, используемые для управления работой установки). Было выделено 95 информативных (значимых) параметров работы электростанции, которые будут фиксироваться в процессе приемо-сдаточных испытаний при проведении 15 работ (проверок) для подтверждения качества изготовления, а также при отладке и обкатке ГТУ. Применение данного метода позволило скомпоновать выделенные работы и провести их за 7 запусков электростанции.

Таблица 1 – Множества, формируемые в ходе работы метода

Описание множества	Обозначение множества	Мощность множества
Измеряемые и контролируемые САУ параметры работы ГТУ НП	<i>Var</i>	500
Информативные (значимые) параметры работы ГТУ НП	<i>Controlled variable</i>	95
Наименование работ (проверок)	<i>Work</i>	15
Степени схожести для всех возможных сочетаний пар подмножеств $CV_i^*$ и $CV_j^*$	<i>Sim</i>	105

## **Выводы:**

- Отмечена важность задачи формирования перечня контролируемых параметров и определения оптимального объема работ в процессе испытаний.
- Предложена теоретико-множественная модель программы испытаний, содержащей *Verification* множество проверок (работ), которые необходимо провести в процессе испытаний и *Controlled variable* множество контролируемых параметров.
- Разработан метод, основанный на комбинации прямого логического вывода для формирования множества контролируемых параметров и нечеткого логического вывода для композиции работ, что позволяет снизить стоимость процесса испытаний и в отличие от существующих позволяет сделать обоснованный выбор с помощью баз правил логического вывода.
- Разработанный метод будет использован в системе поддержки принятия решений процесса испытаний ГТУ НП, что позволит автоматизировать процесс создания программ испытаний для ГТУ НП.

**Спасибо за внимание!**

**Контакты:**

E-mail: [helenshitikova@gmail.com](mailto:helenshitikova@gmail.com)