

## МЕТОД И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕЧЕТКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### Обоснование нечетко-статистического метода управления

Моделирование и регулирование сложных технологических процессов, для которых во многих случаях отсутствуют математические модели составляющих их объектов и общие законы управления, во многих случаях основывается на всестороннем анализе данных и результатов применения программно-целевого управления – мониторинге. Далее для определенности под сложными технологическими процессами будем понимать процессы управления грузовыми железнодорожными перевозками на полигоне железных дорог Украины, сведения о которых (с точностью до каждой технологической операции) непрерывно накапливаются в базах и хранилищах данных и преобразуются в базы знаний автоматизированных систем управления Укрзалізничці. Ясно, что в данных мониторинга такого рода отражены все особенности объекта управления, реализации технологических процессов, а также организации управления ним на различных уровнях. Задача автоматизированного преобразования данных мониторинга в форму математических моделей анализа и управления, в данном случае на основе нечетких экспертных систем, представляет значительную научно-техническую проблему. Предлагаемый метод нечетко-статистического управления (НСУ) имеет целью объединить различные формы описания одного и того же процесса, характеризующие его нормативные (качественные, субъективные) и результирующие (эксплуатационные, фактические) параметры. Введение в модель задачи статистической информации, дополнительной по отношению к показателям степени принадлежности нечетких подмножеств, и представляющей некоторые другие свойства и особенности поведения исследуемых процессов, основывается, прежде всего, на различии между вероятностной и расплывчатой концепциями представления данных [1, 2]. Может быть определена вероятность расплывчатого события

как дополнительное свойство, чтобы получить более полное и точное описание исследуемого процесса. Согласно [1, стр. 183], расплывчатое событие  $A$  в пространстве  $R^n$  с заданной в нем вероятностной мерой  $P$  является расплывчатым подмножеством, когда его функция принадлежности  $\mu_A$  измерима. Вероятность соответствующего расплывчатого события задается интегралом

$$P(A) = \int_{R^n} \mu_A(x) dP = \int_{R^n} (\mu_A(x) f_A(x)) dx, \quad (1)$$

где  $f_A(x)$  – функция плотности. Таким образом, вероятность расплывчатого события определяется с помощью оператора математического ожидания  $P(A) = E(\mu_A)$ . Причем в уравнения вида (1) нечеткие и статистические величины входят одновременно и подобным образом, и это далее использовано в НСУ.

Классический модуль нечеткого управления на основе обработки лингвистических моделей рассматриваемых процессов основан на правилах нечеткой импликации  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ , и состоит из следующих этапов [2]: оценка текущего состояния и “фазификация” входных данных (оценка степеней принадлежности, сопоставление нечетких подмножеств и входных данных), модификация нечетких переменных-заключений для всех правил, формирование результирующих нечетких множеств (или же их суперпозиции), отображение результирующих нечетких множеств в единственное управляющее воздействие (“дефазификация, скаляризация”). Здесь на этапе выбора значения управляющего параметра могут быть использованы различные методы, в частности, методы центра тяжести, максимума функции принадлежности и др., представленные в [2, 3]. Графическая иллюстрация схемы нечеткого вывода показана на рис. 1.

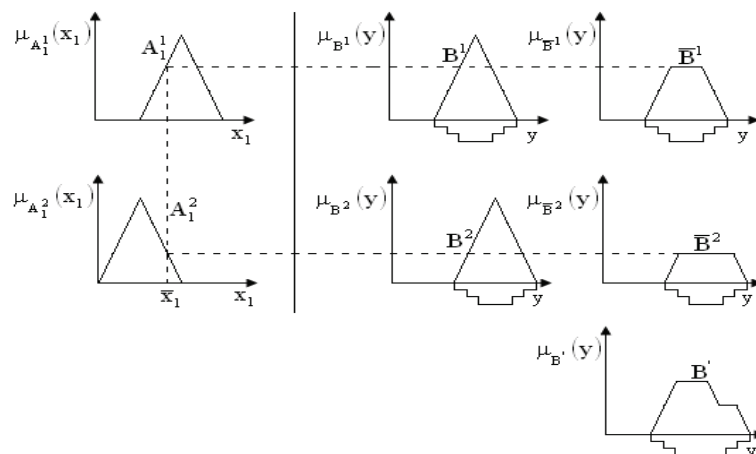


Рисунок 1 - Графическая схема нечеткого вывода

Нетрудно заметить, что представленный метод выбора управления априори предполагает одинаковые вероятности всех возможных значений как входных, так и выходных параметров, относительно которых, в конечном счете, и вычисляется управление. Например, значения параметров управления, имеющие одинаковые (максимальные) значения функции принадлежности, могут различаться по статистическим свойствам – имеют различные вероятности реализации на практике. Неоднородность статистических свойств, как входных переменных, так и управляющих величин, в большинстве случаев имеет место при исследовании параметров сложных технологических процессов. Именно это обстоятельство обосновывает актуальность разработки методов управления в условиях неопределенности, которые объединяют такие различные категории представления наблюдаемых данных как нечеткие, выражающие субъективную интерпретацию процессов, так и статистические свойства, полученные путем их соответствующего анализа. Композиционные модели и методы управления, использующие и статистическую и нечеткую интерпретацию данных, далее будем называть нечетко-статистическими методами управления.

Помимо стандартной схемы нечеткого продукционного управления рис. 1 показывает информационную сущность отличий нечетко-статистического метода, предложенного в данной статье. На рисунке указаны статистические характеристики переменных-заключений, которые условно представлены в форме гистограмм. Эти данные позволяют рассчитать вероятности нечетких подмножеств  $P(\tilde{A})$  различных  $\alpha$ -уровней, необходимые для нахождения значений

(1). Нечеткая компонента характеризует субъективную, нормативную, характеристику состояния объекта, а статистическая – предысторию функционирования. Автоматизированное формирование статистических описаний технологических процессов в случае грузовых перевозок может выполняться по результатам их мониторинга, что обеспечивает адаптацию систем управления. Возможны несколько способов введения в нечеткие модели статистической информации. В работе предложены модификации классического нечеткого управления.

### **Постановка задач нечетко-статистического моделирования и управления**

Для более полного понимания особенностей предлагаемого метода моделирования и выбора решений рассмотрим несколько содержательных постановок задач управления, условия осуществления и свойства решений которых характеризуются статистической и нечеткой информацией. Они имеют различную содержательную базу, но единую формальную структуру, традиционную для использования концепций нечеткого моделирования. Наряду с этим предполагается наличие данных о подобных ранее реализованных задачах, которые составляют дополнительный статистический базис, используемый далее для более обоснованного выбора управления.

Содержание задач по выбору управления ( $\tilde{Y}$ ) при неопределенности далее сводится к оценке необходимой величины некоторого ресурса, либо прогнозу ожидаемого времени выполнения задания при использовании нормативного ресурса. Управление зависит от двух характеристик: объемного показателя ( $\tilde{X}_1$ ) и удельной трудоемкости ( $\tilde{X}_2$ ). Объемный показатель, показатель трудоемкости, а также требуемый ресурс представляются в виде нечетких величин для двух возможных случаев выбора управлений – функционирования системы в условиях близких к нормальным ( $\tilde{S}_1(\tilde{A})$ ), либо при функционировании с перегрузкой ( $\tilde{S}_2(\tilde{B})$ ). В качестве первого примера задачи выбора нечеткого управления рассматривается программная система по обработке сообщений от множества абонентов. Здесь  $\tilde{X}_1$  – средний объем поступающих за

некоторый период сообщений,  $\tilde{X}_2$  – оценка их удельной трудоемкости (сложность обработки отдельного сообщения),  $\tilde{Y}$  – планируемое время обработки сообщений (предполагаемые затраты). Вторым примером связан с переработкой вагонов на станциях. В этой задаче  $\tilde{X}_1$  – средняя степень загрязнения вагонов после выгрузки,  $\tilde{X}_2$  – оценка удельной трудоемкости (размеры и степень смерзания фрагментов и др.),  $\tilde{Y}$  – прогнозируемое время подготовки вагонов под погрузку. Представленные задачи выбора управления обладают рядом особенностей, из которых для нашего исследования наиболее существенными является очевидная невозможность задания точных значений параметров  $\tilde{X}_1$  и  $\tilde{X}_2$ , оценивающих условия задач по выбору управлений  $\tilde{Y}$ .

### Содержание нечетко-статистического управления

В указанных примерах необходимость нечетко-статистического управления может быть обусловлена, по меньшей мере, двумя обстоятельствами, затрагивающими переменные-посылки и переменные-заключения правил продукций модуля нечеткого управления. Первое связано с тем, что, например, согласно предыдущим данным частоты разных возможных значений объемного показателя ( $\tilde{X}_1$ ) и показателя удельной трудоемкости ( $\tilde{X}_2$ ) были не одинаковы. В то же время для одних и тех же предварительных оценок степеней достоверности величин требуемых ресурсов (в некоторой области их возможных значений) частоты реализаций фактических времен (затраченных объемов ресурсов) оказываются различными. Очевидно, что операция дефазификации, как выбор значений параметров управлений (переменных-заключений относительно прогноза требуемых ресурсов) среди одинаковых по достоверности величин, рис. 1, должна учитывать статистическую природу рассматриваемых процессов.

Содержательно более сложным является учет статистической неоднородности значений переменных-посылок при выборе величин управлений. Заметим, что в структуре стандартного нечеткого вывода, рис. 1, роль переменных-посылок состоит в том, чтобы выполнить фазификацию – соотнести текущую ситуацию ( $X_*$ ) с

описанием каждого нечеткого правила и представить оценку меры их соответствия в виде степени принадлежности ( $X_* \in \tilde{A}_k(X)$ ), где  $\tilde{A}_k(X)$  описывает одну из нечетких переменных рассматриваемого правила продукции. Классическая схема рис 1 построена исходя из предположения, что значение ( $X_*$ ) известно точно, и это позволяет однозначно вычислить степень принадлежности  $\mu_F(X_* \in \tilde{A}_k(X))$ . Если же рассматриваемая для принятия решения ситуация ( $X_*$ ) может быть оценена в другом виде, например с точностью до некоторого интервала ( $X_{*\Delta} \in [X_{(-)}, X_{(+)}]$ ), то однозначно вычислить степень принадлежности  $\mu_F(X_{*\Delta} \in \tilde{A}_k(X))$  не удастся. Именно в этом случае статистические свойства переменных-посылок служат дополнительной информацией для расчета обоснованных значений оценок  $\mu_F(X_{*\Delta} \in \tilde{A}_k(X))$ . Разумеется, что для различных форм описаний значений входных множеств, представляющих ситуации принятия решений при неопределенности ( $\hat{X}_*$ ), потребуются соответствующие методики вычисления степеней принадлежности  $\mu_F(\hat{X}_* \in \tilde{A}_k(X))$ .

### Модуль нечетко-статистического управления

Содержательные основания для применения нечетко-статистического управления как при решении задач фазификации, так и при выборе результирующего воздействия, дефазификации, позволяют определить НСУ следующим образом, модифицирующим классическое нечеткое управление [3, 4] с учетом статистической неоднородности процессов на основе (1). Для наглядности и краткости изложения остановимся на представлении нечетко-статистического управления в виде графической схемы, изображенной рис. 2, которая без труда может быть определена аналитически, следуя результатам [3].

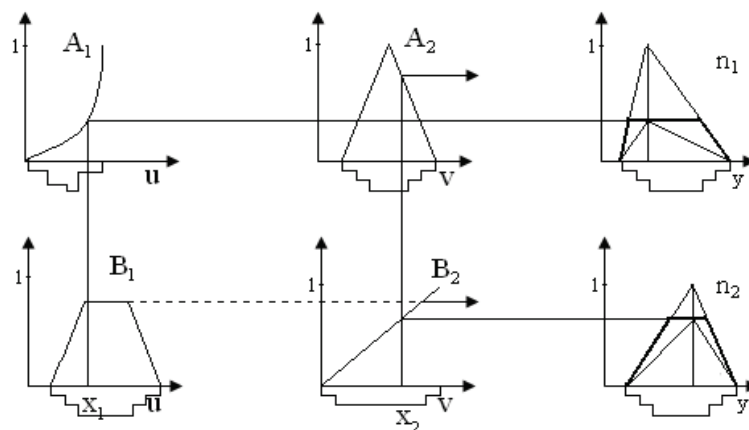


Рисунок 2 - Графическая схема нечетко-статистического управления

Рисунок соответствует указанным примерам задач по выбору управления, когда правила  $\{\pi_j(X \mapsto Y)\}_q$  имеют две нечеткие переменные-посылки  $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$  и нечеткую переменную-вывод  $\tilde{Y}$ . Значения величин  $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$  измеряются с помощью показателей  $\{u, v\}$ . Верхнее правило соответствует ситуации  $(A_1, A_2)$ , частота которой при наблюдениях составляла  $n_1$ , в то время как частота ситуации  $(B_1, B_2)$  равнялась  $n_2$ . В виде условных гистограмм  $G(X_i); i \in \{1, 2\}$  на рис. 2 также представлены свойства неоднородности частот возможных значений переменных-посылок и переменных-заключений. В качестве результирующих значений величин, используемых для установления степеней принадлежности наблюдаемых переменных-посылок, на рис. 2 указаны  $(X_1, X_2)$ . В рамках нечетко-статистического вывода эти значения не определяются однозначно по данным наблюдений (измерений состояний системы), а рассчитываются на основе процедур, подобных вычислению математического ожидания случайных величин, представленных гистограммами. Как показано на рисунке переменные-заключения  $\tilde{Y}$  могут модифицироваться на основе измерений степеней принадлежности посылок в соответствии с различными правилами – Мамдани (минимума), Ларсена (произведения) и др. [2]. В соответствии с одной из основных форм классической процедуры нечеткого управления модификация переменных-заключений  $\tilde{Y}$  выполняется с использованием правила Мамдани для степеней принадлежности переменных-посылок (модификация правой часть правила по уровню меньшей из степеней принадлежности посылок).



Графическая схема рис. 2 отражает следующие этапы процедуры нечетко-статистического вывода:

– 1) расчет результирующих значений величин  $X_i$  для установления степеней принадлежности наблюдаемых переменных-посылок; содержание процедур этого этапа зависит от возможностей идентификации состояния объекта управления, причем далее для определенности считается, что рассматриваемая при принятии решения ситуация ( $X_*$ ) может быть оценена с точностью до некоторого интервала ( $X_{*\Delta} \in [X_{(-)}, X_{(+)}]$ ). Для вычисления  $X_i$  и далее  $\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X))$  используются следующие методы. Во-первых,  $X_i$  является математическим ожиданием с учетом гистограмм распределения в интервале  $[X_{i(-)}, X_{i(+)}]$  возможных значений переменных, то есть

$$X_i = \int_{x \in [X_{i(-)}, X_{i(+)}]} x g_i(x) dx, \quad (2)$$

где

$g_i(x)$  есть функция плотности для данных  $G(X_i); i \in \{1, 2\}$ . На основании значения  $X_i$  стандартным способом, изображенном на рис. 2, вычисляется  $\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X))$ , завершая процедуру фазификации. Во-вторых, величина  $\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X))$  может быть вычислена непосредственно в соответствии с (1) как нормированное взвешенное значение  $\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X))$  для интервала неопределенности  $[X_{i(-)}, X_{i(+)}]$ , согласно

$$\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X)) = \int_{x \in [X_{i(-)}, X_{i(+)}]} \mu_{F_i}(x \in A_i(x)) g_i(x) dx / \int_{x \in [X_{i(-)}, X_{i(+)}]} g_i(x) dx. \quad (3)$$

Обозначения (3) соответствуют выше приведенным величинам.

– 2) На основе  $\mu_F(X_i \in \tilde{A}_i(X))$  посылок для каждого из правил  $\{\pi_j(X \mapsto Y)\}_q$  рассчитывается интегральная оценка степени принадлежности  $\mu_{F_j}\{\pi_j(X \mapsto Y)\}$  – мера его соответствия оцениваемой ситуации выбора управления, что согласуется с классическим нечетким управлением [2]. На этом этапе правила со значениями  $\mu_{F_j}$  меньше заданного уровня могут быть отброшены. Исключение несущественных правил так же может быть выполнено путем сравнительного анализа относительных значений  $\mu_{F_j}$ . При



исключении правил следует учитывать и частоты  $n_1, n_2$  появления ситуаций  $(A_1, A_2), (B_1, B_2)$  и др.

– 3) Выполняются модификации нечетких моделей переменных-заклучений  $\tilde{Y}$  с использованием величин  $\mu_F\{\pi_j(X \mapsto Y)\}$  [2].

– 4) Выполнение операции суперпозиции правил  $\{\pi_j(X \mapsto Y)\}_q$  в соответствии с [2], которая вместе с тем дополняется построением интегральной по всем правилам гистограммы  $G(Y)$ , характеризующей различные частоты реализации возможных значений переменной-решения.

5) Расчет нечетко-статистического управления согласно

$$Y_* = \int_{y \in [Y_{(-)}; Y_{(+)}]} y \cdot \mu_F(y \in \bar{Y}(y)) \cdot g_Y(y) dy / \int_{y \in [Y_{(-)}; Y_{(+)}]} \mu_F(y \in \bar{Y}(y)) g_Y(y) dy \quad (4)$$

### Информационные технологии НСУ. Выводы

Информационная технология нечетко-статистического управления состоит в автоматизированном моделировании величин, входящих в производственные модели  $\{\pi_j(X \mapsto Y)\}_q$ . При этом накопление статистической информации является и формой адаптации базы правил управления. Для автоматизированного формирования нечеткого базиса НСУ могут использоваться разнообразные методы построения функций принадлежности, в частности метод Р.Р. Ягера [3]. Метод и информационная технология НСУ являются эффективной формой адаптивного моделирования и управления по данным наблюдений для сложных динамических процессов и объектов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р., Заде Л. . Принятие решений в расплывчатых условиях. – М.: Мир, 1976. – С.172 – 215.
2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
3. Ягер Р.Р. Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств //в кн. Нечеткие множества и теория возможностей. Под ред. Рональда Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 71 – 78.

Получено 18.03.2008 г.