

УДК 678.028:519.977.5

С. М. Москвина, к. т. н., доц.; С. А. Белоконь

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО РИСКА

В статье предлагается в качестве модели высокотемпературного объекта использовать объединение классической и нейронечёткой модели в целях повышения эффективности принятия решений при возникновении взрывоопасных ситуаций. В отличие от существующих моделей это позволяет на основе разработанных нечётких правил учитывать условия и характеристики рискованных ситуаций.

Ключевые слова: Тепловые объекты, моделирование состояния высокотемпературных объектов, условия риска в высокотемпературных объектах, нейронечеткая модель высокотемпературных объектов

Введение

На сегодняшний день большое внимание отводится энергосберегающим технологиям в бытовых приборах, в сооружениях городского хозяйства и на производстве [1]. Значительная часть таких объектов связана с высокими температурами, наличием газа под высоким давлением, что обуславливает решение актуальных задач обеспечения их взрывоопасности и прогнозирование риска. Одной из таких задач является разработка моделей рассматриваемых объектов для определения условий и характеристик рискованных ситуаций.

В работе под высокотемпературными объектами будем понимать как технические устройства (конструкции, аппараты, машины и их элементы), так и теплофизические процессы, протекающие в термодинамических системах таких устройств [4]. Основной характеристикой высокотемпературных объектов является температурная кривая, которая достигается определенной совокупностью требований, среди которых может быть заданный уровень температуры и давления определенных зон объекта. Моделирование состояния высокотемпературных объектов в условиях риска является сложной задачей, которая требует прогнозирования и предупреждения условий перехода системы в область риска. Ситуацией с повышенным риском будем считать такое состояние объекта, при котором определенные его параметры, такие как: температура, объем газов, давление, близки предельно допустимым границам.

Анализ проблемы

Рассмотрим классический подход к моделированию высокотемпературных объектов. Обычно функционирование высокотемпературных объектов описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, которую можно получить на основе уравнения теплового баланса или на основе моделирования температурно-временных режимов нагрева объекта. Но при таком описании определенного высокотемпературного объекта и определении начальных и предельных условий его функционирования системы дифференциальных уравнений в частных производных могут быть большой размерности, что объясняется большим количеством параметров процесса.

Рассмотрим известную модель промышленного котла, которая на сегодняшний день используются в большинстве городских хозяйств [4]:

$$P_{\tau i} = P_{m.ном.i} (k_{1i} \mu_{1i} p_{1i} + k_{2i} \mu_{2i} p_{2i}), \quad (1)$$

где $P_{\tau i}$ – давление в котле; $P_{m.ном.i}$ – значение номинального давления; p_{1i} , p_{2i} , μ_{1i} , μ_{2i} –

давление пара и открытие регулирующих клапанов цилиндров высокого и среднего давления ($\mu_{2i} = \text{const}$); k_{1i} , k_{2i} – доли мощности цилиндра высокого давления.

При полном определении начальных и предельных условий его функционирования получаем систему дифференциальных уравнений в частных производных вида (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu_{1i}}{\partial t} &= \frac{1}{T_{apci}} \left(\frac{1 - \omega_{\bar{a}}}{\sigma_{apxi}} + \mu_{moi} + \Delta \mu_{mi} - \mu_{1i} \right); \\ \frac{d \Delta \mu_i}{dt} &= \frac{k_{qki}}{T_{mncbi}} (1 - \omega_{\Gamma i}); \\ \frac{dp_{1i}}{dt} &= \frac{1}{T_{tpi}} \left(\sqrt{\frac{p_{ki} - p_{1i}}{k_{tpi}}} - \mu_{1i} p_{1i} \right); \\ \frac{dp_{2i}}{dt} &= \frac{1}{T_{pli}} (\mu_{1i} p_{1i} - \mu_{2i} p_{2i}); \\ \frac{dp_{ki}}{dt} &= \frac{1}{T_{ki}} \left(D_i - \sqrt{\frac{p_{ki} - p_{1i}}{k_{tpi}}} \right); \\ \frac{dD_i}{dt} &= \frac{1}{T_{vi}} (v_i - D_i); \\ \frac{dv_i}{dt} &= \frac{1}{T_{pi}} \left(\frac{1 - \omega_{\bar{a}}}{\sigma_{apci}} - \frac{p_{1i} - 1}{\sigma_{tpi}} - v_i + v_{0i} - k_{p\bar{a}1} \frac{dp_{1i}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где p_{1i} , p_{2i} , μ_{1i} , μ_{2i} – давление пара и открытие регулирующих клапанов цилиндров высокого и среднего давления ($\mu_{2i} = \text{const}$); p_{ki} – давление пара на выходе из котла; D_i – количество пара, генерируемого котлом; v_i – обобщенный показатель, характеризующий подачу топлива, воды и воздух в котел; σ_{apxi} , σ_{tpi} – статизмы регуляторов скорости топливоподачи в котел; $k_{p\bar{a}1}$ – коэффициент усиления регулятора нагрузки котла по первой производной давления “свежего” пара; k_{tpi} – коэффициент, характеризующий потери давления в трубопроводе “свежего” пара; T_{tpi} , T_{pli} , T_{apci} , T_{mncbi} – постоянные времени трубопровода “свежего” пара; μ_{moi} , $\Delta \mu_{mi}$ – управляющие сигналы системы вторичного регулирования частоты и мощности; k_{qki} – коэффициент частотной коррекции системы АРЧМ, k_{1i} , k_{2i} – доли мощности цилиндра высокого давления.

При моделировании высокотемпературных объектов используют аналитические, численные, статистические и вариационные методы. Аналитические методы представляют решение в виде аналитической функции, позволяющей исследовать влияние параметров модели и входных данных на результат решения. Численные и аналитические методы имеют свои преимущества и недостатки. Численные методы позволяют решать сложные краевые задачи, решение которых найти аналитически невозможно или сложно, и позволяют получить приближенные значения исследуемой функции в заданных точках области исследования. Однако численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных существенно зависят от требований к сходимости метода, которые определяются при выборе разностной схемы, и от скорости их решения на ЭВМ, которая стремительно падает с увеличением параметров объекта. Вариационные методы являются довольно распространенными и позволяют получить значение исследуемой функции, тем не менее получить целевую функцию, которая описывает объект исследования, достаточно

сложно.

Следует отметить, что непосредственно параметры рискованных ситуаций обычно не входят в такие модели, а определяются при компьютерном моделировании. Кроме того, на практике анализ взрывоопасных ситуаций определенного объекта обычно представлен в инструкциях в виде набора факторов, влияющих на их возникновение. Так, в случае возникновения ситуации с повышенным риском (например, резкого повышения давления пара) необходимо вмешательство оператора, ошибочные действия которого повышают риск взрыва. Обычно условия возникновения такой ситуации описаны в инструкции в виде факторов:

- изменение температуры питательной воды (с понижением температуры питательной воды перегрев пара увеличится);
- изменение влажности топлива (при снижении влажности твердого топлива температура перегретого пара снижается, а с повышением влажности – увеличивается);
- температура перегретого пара зависит не только от влажности, но и от других свойств топлива, к которым относится степень черноты (прозрачности) факела в топке.

Для моделирования таких состояний используют экспертные оценки [4], позволяющие определять условия и параметры, характеризующие наличие рискованных ситуаций. Основным преимуществом такого подхода является комплексное решение проблемы в доступной форме, но недостатками являются возможная неоднозначность и недостаточная обоснованность отдельных решений, зависящих от опыта эксперта [3].

Таким образом, на наш взгляд, при моделировании высокотемпературных объектов, можно отметить, что в моделях таких объектов необходимо учитывать взрывоопасность, как совокупность факторов риска в виде параметров и условий возникновения рискованных ситуаций, что позволяет формализовать алгоритм принятия решений при управлении объектом.

Подход к моделированию состояния высокотемпературных объектов

В последнее время в разных областях науки и производства используют интеллектуальные технологии, позволяющих получить упрощенные модели и алгоритмы принятия решений. **Целью** данной работы является разработка обобщенной модели высокотемпературного объекта с использованием как традиционных численных методов, так и интеллектуальных технологий, что позволит учесть характеристики возникновения взрывоопасных ситуаций.

Моделирование состояния высокотемпературных объектов будем рассматривать как совокупность классической модели (2) в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (СДР в ЧП) и нейронечеткой модели на основе интеллектуальных технологий. Следует отметить, что при построении нейронечеткой модели требуется дополнительная информация, в качестве которой, на наш взгляд, можно использовать результаты моделирования классической модели, что позволяет сформулировать набор правил, описывающих процесс функционирования объекта. Для дообучения нейронечеткой сети и определения факторов и параметров рискованных ситуаций будем использовать экспертные оценки. По экспертным оценкам формулируется дополнительная часть правил к базе знаний, что обеспечит знания на случай возможных рискованных ситуаций, путем прогнозирования процессов, протекающих в высокотемпературном объекте. Этап корректирования предназначен для подстраивания параметров высокотемпературного объекта.

Рассмотрим более детально этапы построения модели на примере модели парового котла. Как отмечается в [2], наиболее влиятельными параметрами на процессы, протекающие в паровых котлах, являются следующие четыре переменные, которые представлены согласно уравнениям (1) и (2): $P_E = P_{\tau i} - P_{m.ном.i}$ – отклонение давления в паровом котле, которое определяется как разность между текущим значением и определенным стандартным

значением, соответствующим норме; S_E – скорость измерения P_E ; $C_{PE} = P_{\tau(i-1)} - P_{m.ном.(i-1)}$ – отклонение давления, которое определяется как разность между текущим значением P_E и значением, полученным в предыдущем измерении; C_{EE} – скорость отклонения C_{PE} . Состояние котла будем исследовать при изменении степени подогрева пара, то есть изменении давления ($H_C = \Delta\mu_i$ – изменение подогрева).

Для описания значений сменных использовались следующие лингвистические значения (сокращенные названия соответствуют первым буквам слов на английском языке для дальнейшего понимания экспертом): PB – большое положительное, PM – среднее положительное, PS – малое положительное, NO – нулевое, NS – малое отрицательное, NM – среднее отрицательное, NB – большое отрицательное. Для изменения давления H_C при условии повышенного риска был взят большой положительный прыжок PB.

По результатам моделирования классическим методом была создана нейронечёткая сеть типа ANFIS, реализующая систему нечеткого вывода Сугено в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения сигнала. При этом использовались для входа значения P_E и C_{PE} , а для выхода H_C . Назначение слоёв следующее: первый слой – термы входных переменных; второй слой – антецеденты (ссылки) нечетких правил; третий слой – нормализация степени выполнения правил; четвертый слой – вывод правил; пятый слой – агрегирование результата, полученного по разным правилам. Входы сети в отдельный слой не выделяются. На рис. 1 изображен общий вид ANFIS-сети с тремя входными переменными (x_1, x_2, x_3) и пятью нечеткими правилами. Для лингвистической оценки входных переменных x_1, x_2, x_3 используется по 5 термов.

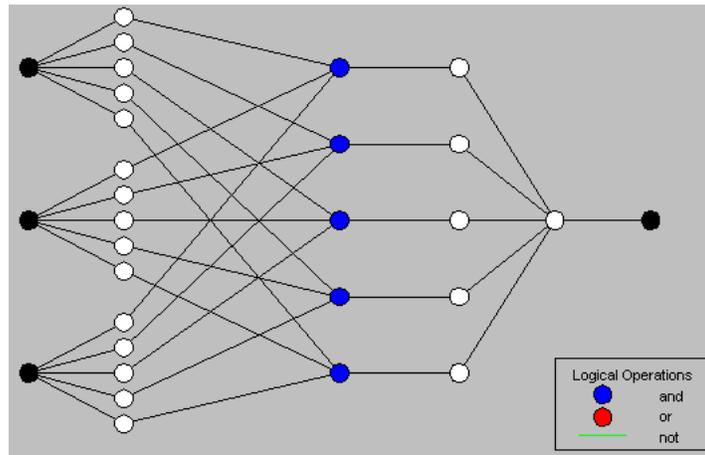


Рис. 1. Архитектура нейронечёткой сети состояний парового котла

В результате был получен набор правил, по которым оценивается состояние высокотемпературного объекта, то есть парового котла, который приводится в таблице 1.

Таблица 1

Набор нечетких правил состояний котла

P_E	C_{PE}	H_C	P_E	C_{PE}	H_C
NB	HE	PB	PO	NB	PM
NB	NS	PM	PO	NM	PM
NM	NS	PM	PO	PB	NM
NS	PS	PM	PO	PM	NM
NS	NO	PM	PS	PS	NM
NO	PB	PM	PS	NO	NM
NO	PM	PM	PB	NS	NM
NO	NB	NM	PM	NS	NM
NO	NM	NM	NO	PS	PS
PO	NO	NO	NO	NS	NS
NO	NO	NO	PO	NS	PS
PO	NO	NO	PO	PS	NS
PO	NO	NO			

Как видно из данного набора правил, большой положительный прыжок давления, который характеризует рискованную ситуацию, описывается лишь одним правилом. Данный факт свидетельствует о том, что область риска в этой модели слабо формализована. После обработки правил экспертом в вышеуказанную совокупность прибавилось два следующих правила, что привело к дополнению базы знаний из позиции рискованных ситуаций:

если $P_E = NB$, то (если $C_{PE} = NB$, то $H_C = PB$);
 если $P_E = NB$, то (если $C_{PE} = NM$, то $H_C = PB$).

Корректировка состояния объекта в рискованных ситуациях, если давление внезапно увеличивалось, осуществлялась путем изменения входных параметров модели на такие, которые не удовлетворяют соответствующие правила. Результаты моделирования относительно сравнения скоростей рассмотренных моделей и предложенной модели приведены в таблице 2.

Таблица 2

Скорости моделей состояний котлов

Модель / Показатель	Тепловой баланс	Распределение температур	Классическая с нейро-нечёткой
Скорость получения результата	8 с	6 с	1,5 с

По результатам моделирования была определена точность предложенной модели, значение которой 0.92, что подтверждает её адекватность. Кроме того она позволяет учитывать рискованные ситуации. Итак, предложенный подход можно применять к высокотемпературным объектам, которые могут содержать ситуации с повышенным риском.

Вывод

В данной работе предлагается модель высокотемпературных объектов рассматривать как совокупность классической и нейронечёткой моделей. Такой подход позволил на основе разработанных нечетких правил учитывать условия и характеристики рискованных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко Э.А. Паровые котлы. – Красноярск.: Октябрь, 2005. – 135 с.
2. Орлов А.И. Теория принятия решений – М.: Март, 2004. – 245 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. / под ред. Аверкина А. Н., Батыршина И. З., Блишуна А. Ф. – Г.: Наука, 1986. – 235 с.
4. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности в 2-х т. – Киев: Наук. думка, т.1. Методология, 2002. - 405 с.
5. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности в 2-х т. – Киев: Наук. думка, т.2. Приложения, 2003. - 392 с.

Москвина Светлана Михайловна – к. т. н., доцент кафедры компьютерных систем управления, e-mail: moskvina@ukr.net, тел.: (0432)-598222.

Белоконь Сергей Анатольевич – аспирант кафедры компьютерных систем управления, e-mail: serge.belokon@gmail.com, тел.: (0432)-598222.

Винницкий национальный технический университет.