

УДК 004.942

**ПРЕДПОСЫЛКИ И ВАРИАНТЫ РАЗВИТИЯ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ
МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ****Сабитов М.А., Семенов Б.В., Кузяков О.Н.***ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет (ТИУ)», Тюмень,
e-mail: marat-030997@mail.ru, semenovbv@tyuiu.ru, kuzjakovon@tyuiu.ru*

В статье рассматривается моделирование парового котла как многосвязной системы. Для описания многосвязной системы предлагается использовать декомпозицию системы на функциональные блоки, в пределах которых происходит взаимодействие потоков теплоносителей. На основании связей между блоками предлагается строить структурную схему объекта и с помощью передаточных функций описывать взаимодействие потоков между собой и со средой. Использование передаточных функций вызвано целью создания модели – анализа процессов управления и синтеза управляющих или корректирующих устройств. Поскольку моделируемая система является нестационарной и нелинейной, параметры передаточных функций являются зависимыми от параметров потоков, среды взаимодействия и внешних факторов. Неопределенность в определении указанных зависимостей, сложность использования классических моделей гидродинамики и теплообмена создают предпосылки для использования дискретных моделей описания потоков сплошных сред. При этом принципиальным является получение некоторых интегральных характеристик потоков, замена распределенной системы эквивалентом с сосредоточенными параметрами, кроме того, большое внимание уделяется эффективности вычислительных алгоритмов. Анализируются современные подходы к формированию адекватных моделей потоков теплоносителей, оценивается возможность применения теории вероятностей и математической статистики, искусственных нейронных сетей, аппарата нечеткой логики и клеточных автоматов.

Ключевые слова: теплоэнергетика, паровой котел, имитационное моделирование, многосвязная система, нестационарная система, передаточная функция, структурная схема, неопределенность

**BACKGROUND AND DEVELOPMENT OPTIONS OF HYBRID MODELS
FOR MULTI-CONNECTED SYSTEMS IN HEAT POWER ENGINEERING****Sabitov M.A., Semenov B.V., Kuzyakov O.N.***Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen,
e-mail: marat-030997@mail.ru, semenovbv@tyuiu.ru, kuzjakovon@tyuiu.ru*

The article provides models of a steam boiler as a multi-connected system. To describe a multi-connected system, it is proposed to use the decomposition of the system in functional blocks, within which the interaction of heat transfer fluid flows occurs. Based on the relationships between the blocks, it is proposed to create a structural scheme of the object and, using transfer functions, to describe the interaction of flows between themselves and with the environment. The use of transfer functions is caused by the main aim of simulation – the analysis of control processes and the synthesis of control or corrective devices. This model is non-stationary and non-linear, and the parameters of the transfer functions depend on the parameters of the flows, the interaction environment, and external factors. Uncertainty about the dependencies' types, the complexity of using classical hydrodynamics and heat transfer models are the reasons impelling to implement discrete description of continuum mechanics models. In this case, it is fundamentally to obtain some integral characteristics of the flows, replacing the distributed system with an equivalent with lumped parameters. In addition, much attention is paid to the efficiency of computational algorithms. The modern approaches to the formation of adequate flow models are analyzed, the possibility of using probability theory and mathematical statistics, artificial neural networks, fuzzy logic and cellular automata is evaluated.

Keywords: heat power engineering, steam boiler, simulation, multi-connected system, non-stationary system, transfer function, structural scheme, uncertainty

Вся история человечества характеризуется настойчивыми попытками описания окружающего мира в строго фиксированных категориях. Философские рассуждения каждой эпохи сводились к поиску первопричин, литература – к отражению наиболее актуальных проблем своего периода. Широко известные легенды и мифы Древней Греции – это не что иное, как систематизация частичных представлений о мире в художественной форме, выражающая непоколебимую идею об упорядоченности и обусловленности событий. С развитием точных и естественных наук произошел

раздел сфер влияния, так что несмежные области знания начали говорить практически на разных языках. Лишь с рождением таких понятий, как «системный подход» и «системные исследования», междисциплинарность и диффузия одних наук в другие стали очевидными и рациональными в научном сообществе. Параллельно с этим начали набирать силу такие направления, как имитационное моделирование, исследование операций, синергетика [1]. К настоящему моменту взаимное влияние преобразило самую суть смежных дисциплин и размыло границы между ними.

Моделирование технологических систем и процессов – несравненно более узкая сфера изысканий, имеющая, тем не менее, колоссальное влияние на жизнь общества. Централизованное производство тепловой и электрической энергии априори требует высокой степени внимания к показателям надежности, безопасности, эффективности и экологичности. Многие объекты топливно-энергетического комплекса относятся к категории многосвязных нестационарных нелинейных объектов управления, и на данный момент разработано множество подходов к моделированию подобных систем. Так, в статье [2] описан классический подход к построению математических моделей многосвязных объектов управления, состоящий в переходе от качественных зависимостей между переменными объекта к структурированной формализации задачи. В работе [3], напротив, предпочтение отдается перспективным методам управления ГТУ – адаптивной САУ с эталонной моделью, САУ с применением нечеткой логики и управляющей системе, основанной на нейронных сетях.

Рассматривая модель с позиции ее использования в процессе автоматического управления, авторы склоняются к использованию гибридной модели, включающей в себя аппарат теории автоматического управления, классического дифференциального исчисления и технологий искусственного интеллекта. Целью данной работы является анализ современных подходов к построению моделей многосвязных объектов, перспектив использования гибридных алгоритмов в данном контексте.

Материалы и методы исследования

В статье [4] авторами рассматривался подход, основанный на декомпозиции технологического объекта или технологического процесса и представлении каждой части в виде некоторого функционально-го блока. Предполагалось, что блоки воздействуют

друг на друга с помощью потоков различной природы – энергии, вещества, а также информации – а потому могут определять некоторые операции над потоками. Рассматриваемая система – паровой котел в составе парогазовой установки – представляет собой многосвязную нелинейную нестационарную систему, в которой основное значение имеют потоки теплоносителей. Эти потоки в системе движутся по индивидуальным траекториям, пересекая блоки в определенном порядке и взаимодействуя в пределах каждого блока между собой, а также напрямую с самой системой, косвенно – с окружающей средой. Таким образом, можно утверждать, что на характер взаимодействий внутри блока оказывают влияние три группы величин:

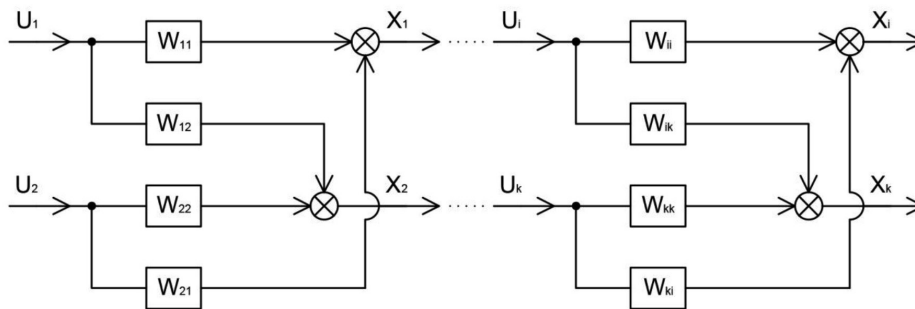
1. Характеристики потоков.
2. Характеристики среды взаимодействия – то есть самого блока.

3. Внешние причины, не относящиеся ни к блоку, ни к рассматриваемым потокам (это могут быть неучтенные факторы, в частности неучтенные потоки).

На данном этапе будем рассматривать каждый поток и сам блок как объекты с сосредоточенными параметрами, но, как отмечалось ранее, нестационарные. Процессы внутри блока могут быть описаны следующей системой уравнений в изображениях по Лапласу:

$$\begin{bmatrix} X_1(p) \\ X_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1(p) \\ U_2(p) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $U_1(p)$ – изображения некоторого входного параметра первого потока; $U_2(p)$ – изображения входного параметра второго потока; $X_1(p)$ – изображения некоторого выходного параметра первого потока; $X_2(p)$ – изображения выходного параметра второго потока; $W_{ij}(p)$ – передаточная функция, связывающая изменение выходного параметра i с изменением входного параметра j . Движение потоков теплоносителей в общем случае предполагает прохождение различных последовательностей блоков. В пределах каждого блока процессы взаимодействия могут быть описаны с помощью передаточных функций – по четыре на каждый блок. Для использования этих передаточных функций в вычислительном эксперименте необходимо определить как их типы, так и определяющие параметры. Рассматриваемая многосвязная система может быть описана структурной схемой следующего вида (рисунок).



Структурная схема многосвязного объекта управления с двумя потоками теплоносителей – потоком пара (воды) и потоком дымовых газов

Проанализируем смысловую нагрузку каждой передаточной функции:

– W_{11} (как и W_{ii}) связывает изменение выходного параметра первого потока с входным параметром того же потока – эта передаточная функция не учитывает взаимодействие потоков между собой, но акцентирует внимание на взаимодействии потока со средой;

– W_{22} (как и W_{kk}) связывает изменение выходного параметра второго потока с входным параметром того же потока – по смысловому значению эта передаточная функция аналогична W_{11} ;

– W_{12} (как и W_{ik}) связывает изменение выходного параметра второго потока с входным параметром первого потока – эта передаточная функция учитывает взаимодействие потоков между собой, не учитывая их взаимодействие со средой;

– W_{21} (как и W_{ki}) связывает изменение выходного параметра первого потока с входным параметром второго потока – по смысловому значению эта передаточная функция аналогична W_{12} .

Будем исходить из физической и химической природы процессов, происходящих в системе, при решении задач структурной и параметрической идентификации. На данном этапе будем рассматривать передаточные функции без запаздывания. Взаимодействие потоков со средой не предполагает теплообмен, однако, поскольку движение теплоносителей происходит в каналах, потоки теряют энергию на преодоление линейных и местных гидравлических сопротивлений. В пределах одного блока линейные участки могут чередоваться с местными сопротивлениями, и общие потери давления в результате движения по такому участку для потоков рассчитываются по формуле

$$\Delta p = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^m \xi_i w_i^2 \rho_i + \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{D_j} \lambda_j w_j^2 \rho_j \right], \quad (2)$$

где w_i , w_j – скорость потока на i -м и j -м участках соответственно, м/с; ρ_i , ρ_j – плотность потока на i -м и j -м участках соответственно, кг/м³; ξ_i – коэффициент местного гидравлического сопротивления на i -м участке; L_j – характеристическая длина j -го участка, м; D_j – характеристический диаметр j -го участка, м; λ_j – коэффициент Дарси (коэффициент потерь на трение по длине) j -го участка. Перепад давления, испытываемый на участке, может быть измерен при различных скоростях и температурах потока, а затем по экспериментальным значениям Δp , w , T могут быть определены функциональные зависимости. С большой долей вероятности можно предположить, что прямое или косвенное измерение температуры и скорости потока производится не на всех локальных участках, общее количество которых равно $m + n$. Совокупность участков неоднородна, сложна и характеризуется следующими особенностями:

1. Участки неравномерны как по геометрическим, так и по техническим свойствам, а потому вносят различный вклад в изменение параметров потока.
2. Изменение целевого параметра не обязательно является монотонной функцией пройденного потока пути.
3. Количество участков, которое может быть выделено, является произвольным, поэтому необходим некоторый критерий, задающий условие остановки дробления.

Усреднение скорости потока в качестве одного из возможных решений означает постоянство режи-

ма течения, что в свою очередь отразится на модели теплообмена между потоками. Уравнения, описывающие турбулентный режим движения жидкости или газа по сравнению с ламинарным режимом имеют корреляции, вызванные не только пульсациями скорости, но и пульсациями плотности и температуры, при этом для замыкания системы уравнений требуются дополнительные соотношения [5]. Очевидно, что эта часть модели требует подробного изучения и принятия специального решения.

Для описания взаимодействия между потоками теплоносителей можно попытаться использовать аperiодическое звено первого порядка, что требует на этапе параметрической идентификации вычисления четырех неизвестных параметров (коэффициенты W_{12} и W_{21}). В работе [4] было предложено использовать следующее определение постоянной времени, полученное на основе подобию физических процессов:

$$T = C_p \cdot L \cdot R, \quad (3)$$

где L – характеристический размер рассматриваемого объема газовой смеси в блоке, м; c_p – изобарная теплоемкость газовой смеси, Дж/(м³·К); R – термическое сопротивление в блоке, К·с·м²/Дж. Для расчета изобарных теплоемкостей были аппроксимирующие функции, термическое сопротивление является величиной, обратной коэффициенту теплопередачи, характеристический объем в связи с неопределенностью состояния потока подлежит уточнению.

Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность взаимодействия потоков и определяет теплообмен между ними. Примем за основной параметр потока температуру. Поскольку значения температур потоков на выходе и входе из блока предполагаются известными или рассчитанными, то коэффициент может быть вычислен, казалось бы, банальным отношением температуры на выходе к температуре на входе. Такой расчет имеет три серьезных недостатка:

1. Не учитываются инерционные свойства потоков.
2. Не учитываются транспортные запаздывания.
3. Коэффициенты передачи зависят от самих температур потоков и от множества других факторов, причем учесть все в полной мере априори невозможно.

Следовательно, процесс теплообмена также требует некоторого приближения.

Результаты исследования и их обсуждение

Нужно отметить, что в целом нас интересует некоторая интегральная характеристика взаимодействия, построенная на основе усредненных параметров потоков. Основная сложность заключается в моделировании самих потоков. Поскольку поток представляет собой ключевую фигуру в предлагаемой концептуальной модели, рассмотрим возможные варианты его описания. На текущий момент в качестве базы имитационного моделирования выделяют четыре парадигмы: дискретно-событийное моделирование, динамическое моделирование, системная динамика в смысле Форрестера и мультиагентный подход. При этом все четыре компонента используют причин-

но-следственный механизм продвижения процессов во времени, а отличия заключаются в оперировании различными наборами объектов [6].

Известно, что параметры, определяющие тепловые процессы, носят неопределенный интервально стохастический характер. В работе [7] предложен метод моделирования, основанный на получении уравнений для статистических мер (математических ожиданий, дисперсий, ковариаций) тепловых процессов при заданных статистических мерах входных интервально стохастических определяющих параметров. Однако в данной работе предполагается разбиение системы на совокупность изотермических элементов, находящихся во взаимодействии между собой, в то время как принятая концепция предполагает изобарные и неизотермические процессы. К тому же предлагаемые изотермические элементы располагаются неподвижно в пространстве, что совершенно отличает их от потоков, которые движутся с переменной скоростью и взаимодействуют друг с другом в различных сечениях.

Очевидно, что описание потока в каждой его точке при заданном уровне дискретизации является избыточным с позиции процесса управления – требуются лишь некоторые интегральные характеристики потоков. Кроме того, следует учитывать зашумленность измеренных сигналов. Все вышперечисленное наталкивает на мысль использования нечеткой логики для устранения неопределенности в определении характеристик потока. Нечеткая логика особенно уместна, когда процесс сложен, не полностью известен, медленен и труден для моделирования аналитически или экспериментально [8]. Основное требование, однако, заключается в том, что должна быть доступна база знаний. Использование нечетких множеств при высокой степени гранулированности информации позволяет сократить объем обрабатываемой информации и тем самым ускорить вычисления [9]. Для обучения нечеткой модели потока можно использовать методы, основанные на использовании нейронечетких сетей.

В статье [10] рассматривается моделирование поведения газа с помощью клеточного автомата, функционирующего в режиме синхронной работы. На каждом шаге по времени изменение состояния происходит в два этапа: сначала происходит перемещение частиц в соседние узлы (этап сдвига), а затем соударение частиц в узлах (этап столкновения). Эффективность применения клеточных автоматов привела к большому разнообразию их типов, описываемых

во множестве публикаций. Так, в исследовании [11] демонстрируется применение нечеткого клеточного автомата для регулирования поля температуры. Показано, что задачу расчета поля температуры в динамических условиях можно решить с помощью нечетких клеточных автоматов без памяти или нечетких комбинационных схем. Матричный подход нечеткой логики позволяет достичь большей гибкости в использовании аппаратных ресурсов, чем вычислительный метод, основанный на решении интегродифференциальных уравнений.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что предлагаемая авторами концепция построения блочной модели парового котла может быть реализована в виде гибридной информационной системы, основанной на применении операторного исчисления и подкрепленной методами искусственного интеллекта. Результаты подобного синтеза будут представлены в последующих работах.

Список литературы

1. Моделирование систем и процессов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Издательство Юрайт, 2019. 450 с.
2. Саиф Н.М., Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Башкатова А.В., Мамонтов А.А. Математические модели многосвязных объектов управления // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т. 25. № 1. С. 53–62. DOI: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062.
3. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В. Сравнительный анализ перспективных методов автоматического управления газотурбинной установкой как многосвязным объектом управления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 28. С. 18–31.
4. Сабитов М.А., Ведерникова Ю.А. Разработка модели установки комбинированного цикла с использованием функциональных блок-диаграмм // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 5. С. 38–43.
5. Павловский В.А., Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 368 с.
6. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К анализу парадигм имитационного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 552–558. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558.
7. Мадера А.Г., Кандалов П.И. Математическое моделирование интервально стохастических тепловых процессов в технических системах при интервальной неопределенности определяющих параметров // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 3. С. 501–520. DOI:10.20537/2076-7633-2016-8-3-501-520.
8. De Silva C.W. Intelligent control: fuzzy logic applications. N.Y.: CRC Press, 2018. 368 p.
9. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 801 с.
10. Бобков С. П., Чернявская А. С. Имитация потоков сплошной среды с использованием дискретных моделей // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 68–75.
11. Марценюк М.А., Селетков И.П. Нечеткий клеточный автомат для регулирования поля температуры // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2–3 (217–222). С. 125–138. DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.11.