

УДК 681.5

А.Н. Краснов

Доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»
кандидат технических наук, доцент

А.А. Шарифуллин

магистрант 1 курса
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ УСТАНОВКИ ВИСБРЕКИНГА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

Аннотация: качество продукции предопределяет уровень спроса покупателей на любую категорию продукции при соответствующей цене. Технологическим параметром, определяющая характеристику продукции, является показатель качества. В статье приведено исследование и разработка математической и имитационной моделей вакуумного блока установки висбрекинга нефтеперерабатывающего завода. По итогам исследования разработана автоматизированная система управления по показателям качества на основе нейронных сетей.

Ключевые слова: система управления, показатель качества, имитационная модель, нейронная сеть, C++, установка висбрекинга.

Введение

Разработка системы управления процессами нефтехимической переработки по показателям качества является одной из актуальных тем. В Уфимском государственном нефтяном техническом университете в настоящее время активно ведутся работы, посвящённые данной тематике, достигнуты значимые результаты, внедрённые на производства нефтехимического кластера Республики Башкортостан [1].

Под контролем показателей качества понимается проверка соответствия количественных или качественных характеристик продукции или процесса, от которого зависит качество продукции, установленным техническим требованием. Суть контроля показателей качества продукции на предприятии заключается в получении информации о состоянии объекта и сопоставлении полученных результатов с установленными требованиями, зафиксированными в чертежах, стандартах, договорах поставки и других документах. В нефтехимической промышленности объекты производства представляют собой совокупность технологических процессов, а также вспомогательных и обслуживающих служб, обеспечивающих нормальное функционирование промышленного предприятия. Для данного производства важно иметь информацию о параметрах для работы производства в штатном режиме, но для оценки получаемого продукта необходимо крайне иметь контроль над показателями качества, влияющие на ценность получаемого продукта.

Эффективным средством предоставления оперативных данных о качестве продукции являются автоматические потоковые анализаторы, которые осуществляют автоматический отбор проб продуктов и анализ показателей качества. Их применение зачастую ограничено или технологическими трудностями их применения, или высокой стоимостью. По этим причинам в основном данную работу выполняют отделы технического контроля, лаборатории или аналогичные подразделения служб качества предприятий.

Гипотеза

При внедрении автоматизированной системы управления по показателю качества повысится быстродействие и эффективность управления, что повлечёт за собой уменьшение потерь производства целевой продукции, повышая экономические показатели.

Методы

Объект разработки системы управления по показателю качества является вакуумный блок установки висбрекинга гудрона нефтеперерабатывающего завода.

Для реализации разработки выполняются следующие задачи:

- разрабатывается математическая и имитационная модель, предназначенной для оценки показателей качества при различных режимных параметрах, оказывающих влияние на технологический режим;

- анализируется и оценивается разработанная модель путём проведения идентификации;

- создается системы управления вакуумным блоком по показателю качества и её реализация путём внедрения программы в SCADA-систему.

Моделирование процесса для расчета показателя качества предполагает определение связей его с технологическими параметрами. К таким моделям относятся формальные модели, представляющие собой уравнения регрессии, нейросетевые модели и феноменологические модели. Расчет по ним производится за существенно меньшее время, адаптация таких моделей под конкретный процесс дешевле и быстрее.

Задачей разработки моделей, которая определяет удовлетворительную работу технологического режима в вакуумной колонне вакуумного блока, является поддержание значений основных технологических параметров колонны:

- давление верха колонны 6,53 кПа;
- температура верха колонны 116 °С;
- расход верхнего циркуляционного орошения 89 м³/час;
- температура 95 % отгона 336 °С;
- температура вспышки 109 °С.

При выполнении разработки и сохранении значений параметров с учётом погрешностей допустимо считать выполненную работу успешным.

Для разработки модели применяются статистические данные зависимости показателя качества от режимных параметров и показателей качества, полученные из узла отбора проб.

Для определения взаимосвязанности статистических данных проводится корреляционный анализ, где определяются коэффициенты корреляции. По результату анализа коэффициенты корреляции имеют значения в диапазоне 0,6...0,8, что говорит о существующей взаимозависимости между этими критериями.

По завершении анализа статистических данных проводится разработка формальных моделей в статике.

Формальные модели – это модели, формально устанавливающие связь выходного параметра с входными, как правило, это статические уравнения регрессии, нейросетевые модели, нечеткие модели и т. д., получаемые на основе анализа статистического материала. Формальные модели позволяют решать обратные задачи моделирования, а именно, в условиях заданного качества сырья, вида технологического оформления процесса и режимных параметров определяются связи показателей качества с технологическими параметрами.

Формальные модели наиболее подходят для решения задач оперативного управления по показателям качества получаемых продуктов [2].

Для построения моделей расчёта показателей качества в статике используются модели вида:

$$ПК_{п.} = k_1 \cdot P + k_2 \cdot T + k_3 \cdot G_{ВЦО}, \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты для формальной модели;

P – давление верха колонны, кПа;

T – температура верха колонны, °С;

$G_{ВЦО}$ – расход ВЦО, м³/час.

В качестве формальной модели используется линейная модель, коэффициенты которой определяются методом наименьших квадратов (с применением матрицы).

Основу метода наименьших квадратов составляют следующие представления. Некоторый параметр, в данном случае показатель качества, функционально связан с остальными параметрами, а именно с параметрами технологического режима, однако характер соответствующей функции неизвестен; кроме того, в имеющемся эмпирическом материале эта связь дополнительно подвергнута помехам. Требуется аппроксимировать эту функциональную связь линейной функцией так, чтобы минимизировать ошибку аппроксимации в точках, заданных эмпирическими данными.

На рисунке 1 приведена структурная схема модели в статике.

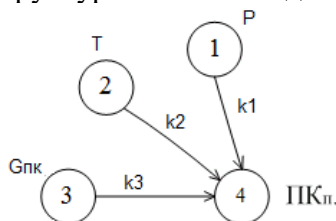


Рисунок 1. Структурная схема расчета ПК в статике

Коэффициенты для формальной модели определяются с помощью программы MS Excel.

Алгоритм определения коэффициентов следующий.

Сначала рассчитываются элементы матриц А и В по формулам:

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^N x_{ik} \cdot x_{jk}, \quad (2)$$

$$b_i = \sum_{k=1}^N x_{ik} \cdot y_k, \quad (3)$$

где x_{ik}, x_{jk} – значения переменных из таблицы исходных данных из i -й и j -й колонок k -й строки;

y_k – значение аппроксимируемого ПК из k -й строки;

N – количество строк в таблице с исходными данными.

После расчёта элементов формируются матрицы А и В. Матрица А состоит из элементов a_{ij} , матрица В представляет собой вектор-столбец из элементов b_i . Результат формирования матриц представлен на рисунке 2.

a_{ij}	i1	i2	i3	b_i	Для y_1	Для y_2
1j	681,43	12127,4	9282,47	b1	35116,8	11460,3
2j	12127,4	215995	165340	b2	625442	204082
3j	9282,47	165340	126567	b3	478766	156217

Рисунок 2. Сформированные матрицы А и В

Сформированные матрицы А и В позволяют определить значения коэффициентов. Изначально находятся главные определитель Δ матрицы А, затем определители Δ_і следующим образом: в матрице А і-й столбец заменяется на вектор-столбец В и находится определитель полученной матрицы. Результаты вычисления матриц и их определителей представлены на рисунке 3.

Матрица а1			матрица а2			матрица а3		
35116,8	12127,4	9282,47	681,43	35116,8	9282,47	681,42984	12127,4	35116,8
625442	215995	165340	12127,4	625442	165340	12127,365	215995	625442
478766	165340	126567	9282,47	478766	126567	9282,4735	165340	478766
определители								
Δ1	271436		Δ2	154198		Δ3	135621,29	

Рисунок 3. Расчёты и результаты определителей матриц

Коэффициенты определяются по формуле

$$k_i = \frac{\Delta_i}{\Delta} \tag{4}$$

По найденным значениям коэффициентов определяются T_{отг} и T_{всп}. Формальные модели для расчета T_{отг} и T_{всп} соответственно имеют вид:

$$T_{отг} = 2,876 \cdot P + 1,634 \cdot T + 1,437 \cdot G_{ВЦО}, \tag{5}$$

$$T_{всп} = 1,781 \cdot P + 1,667 \cdot T - 1,074 \cdot G_{ВЦО}. \tag{6}$$

Для оценки моделей (5) и (6) проводится проверка на адекватность.

Адекватность оценивается по относительной погрешности и среднеквадратическому отклонению. Проводится исследование адекватности экспериментальных данным результатов расчета температуры 95 % отгона и температуры вспышки по различным эмпирическим уравнениям вида

$$\delta_i = \left| \frac{ПК_{Pi\text{расч}} - ПК_{Pi\text{эксп}}}{ПК_{Pi\text{эксп}}} \right|, \tag{7}$$

$$\sigma_{\text{квдр.}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}}{n}, \tag{8}$$

где δ_і – относительная погрешность;

і – номер опыта;

σ_{квдр.} – среднеквадратическое отклонение;

n – общее количество точек.

Результаты вычисления погрешностей не превышают 10 %, следовательно, результаты проверки на адекватность удовлетворительные.

Производится реализация моделей для расчета T_{отг} и T_{всп} по заданным значениям. Результаты реализации представлены на рисунке 4 и 5 соответственно.

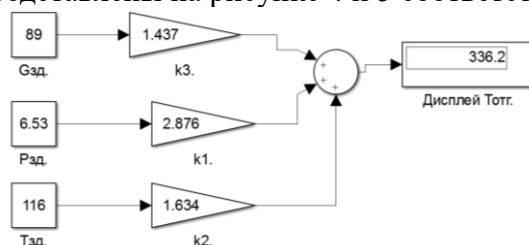


Рисунок 4. Модель расчёта температуры 95 % отгона в статике

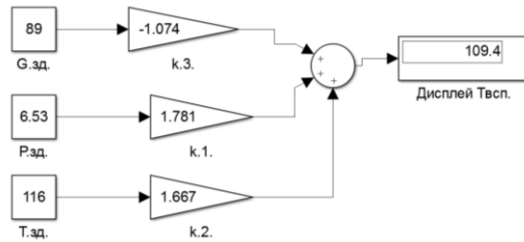


Рисунок 5. Модель расчёта температуры вспышки в статике

При разработке модели динамики показателей качества в качестве топологической структурной схемы объекта управления с передаточными функциями в соответствии с теорией графов составляется схема для $T_{отг}$, приведенная на рисунке 6. Построение схемы проводится с учётом того, что регулирование расхода верхнего циркуляционного орошения осуществляется через регулирование температуры верха (каскадное управление).

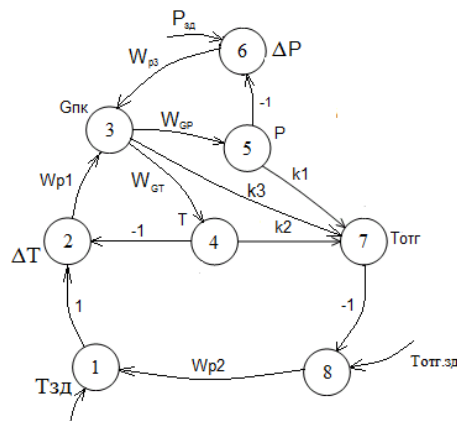


Рисунок 6. Топологическая схема объекта

Топологическая схема для $T_{всп}$ аналогична.

Применяется комбинированный метод построения модели, где параметры определены по результатам эксперимента, а структура модели аналитически [2].

Исследования влияния одних параметров на другие указывают на применение передаточных функций вида апериодического звена первого порядка.

Передаточная функция по каналу расход топлива – температура 95 % отгона имеет вид:

$$W_{GT} = \frac{k_{GT}}{T_{GT} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{GT} \cdot s}, \tag{9}$$

где W_{GT} – передаточная функция по каналу расход-температура;

k_{GT} – коэффициент усиления.

Коэффициент усиления равен

$$k_{GT} = \frac{T_{max} - T_{min}}{G_{max} - G_{min}} = \frac{116,9 - 115,6}{89,08 - 88,73} = 3,71. \tag{10}$$

Постоянная времени для апериодического звена первого порядка может быть найдена экспериментально: чем больше время T , тем дольше длится переходный процесс.

Применяются следующие значения для передаточной функции по каналу «GT»:

– постоянная времени T_{GT} , равная 4 с.;

– запаздывание τ_{GT} , равное 3 с.

Искомая передаточная функция имеет вид:

$$W_{GT} = \frac{3,71}{4 \cdot s + 1} \cdot e^{-3 \cdot s}. \quad (11)$$

Аналогичным образом определена передаточная функция W_{GP} :

$$W_{GP} = \frac{0,552}{4 \cdot s + 1} \cdot e^{-3 \cdot s}. \quad (12)$$

Запаздывание при осуществлении регулирования устраняется путем введения стабилизирующего контура. Необходимость применения каскадных систем обусловлена тем, что многие промышленные объекты характеризуются большим запаздыванием и значительными возмущениями. Одноконтурные АСР при управлении такими объектами не всегда обеспечивают требуемое качество управления.

Инерционность ликвидируется регулятором W_{p1} , а неидеальность компенсации внутренним контуром компенсируется за счет работы внешнего контура.

Проведя анализ передаточных функций объекта управления, были получены следующие передаточные функции регуляторов:

$$W_{p1} = 0,01 + \frac{0,05}{s}, \quad (13)$$

$$W_{p2} = 0,05 + \frac{0,01}{s}, \quad (14)$$

$$W_{p3} = 0,1 + \frac{0,01}{s}. \quad (15)$$

Процесс разработки модели в динамике осуществляется поэтапно в пакете динамического моделирования Matlab.

На первом этапе строится внутренний контур регулирования по температуре. На рисунке 7 приведена имитационная модель.

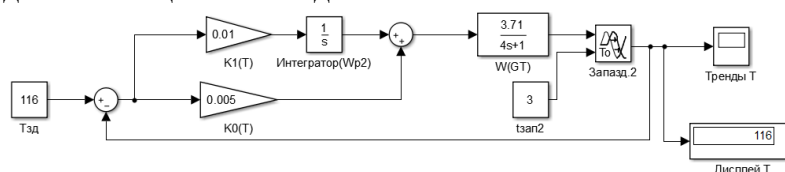


Рисунок 7. Внутренний контур регулирования

Далее организуется моделирование динамики показателей качества. На рисунке 8 приведена реализованная модель.

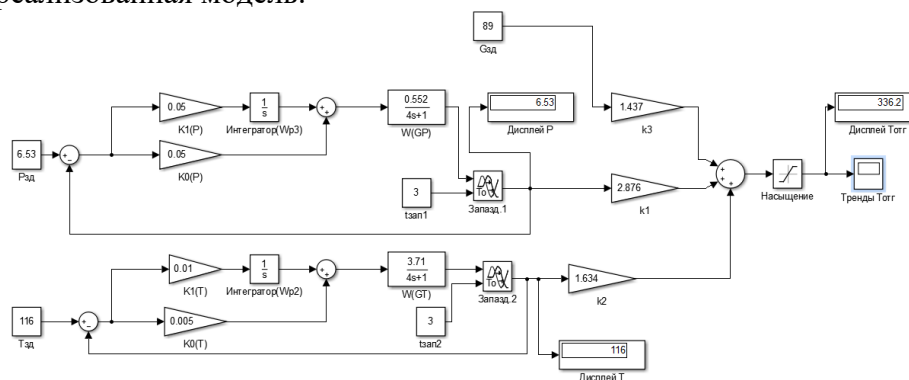


Рисунок 8. Модель определения $T_{отг}$ в динамике

После этого устанавливается внешний контур регулирования. Учитываем возмущение – расход сырья постоянно изменяется, в связи с чем меняется и $T_{отг}$. На рисунке 9 изображена смоделированная АСР по температуре 95 % отгона.

Результат моделирования АСР по температуре вспышки изображены на рисунке 10.

Для анализа разработанной модели проведём идентификацию модели в интерфейсе System Identification Toolbox пакета Matlab.

Под идентификацией динамических моделей понимают процедуру определения структуры и параметров их математических моделей, которые при одинаковых входном сигнале объекта и модели обеспечивают близость выхода модели к выходу объекта при наличии какого-то критерия качества [3].

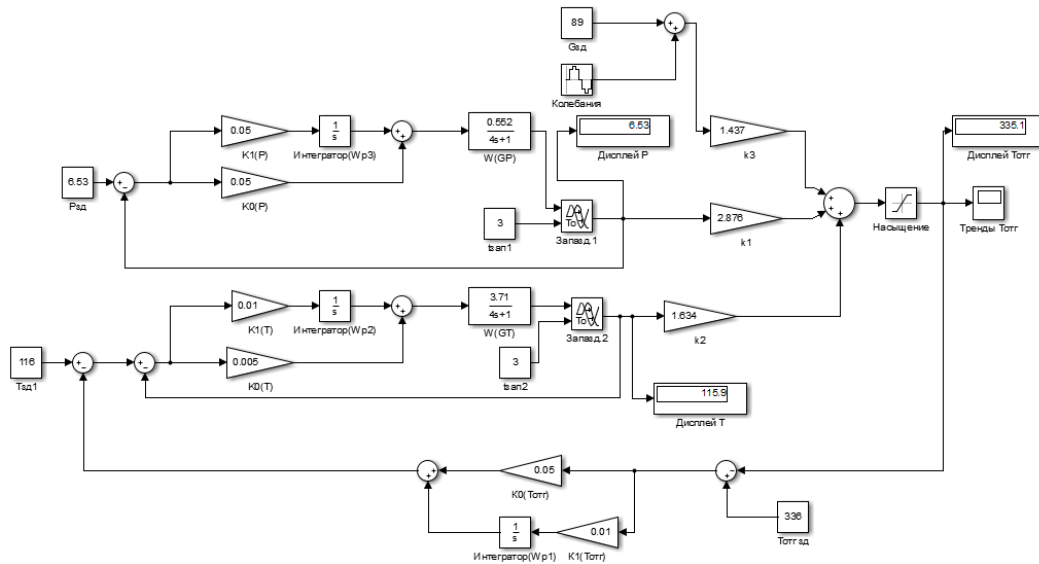


Рисунок 9. АСР по T_{opt}

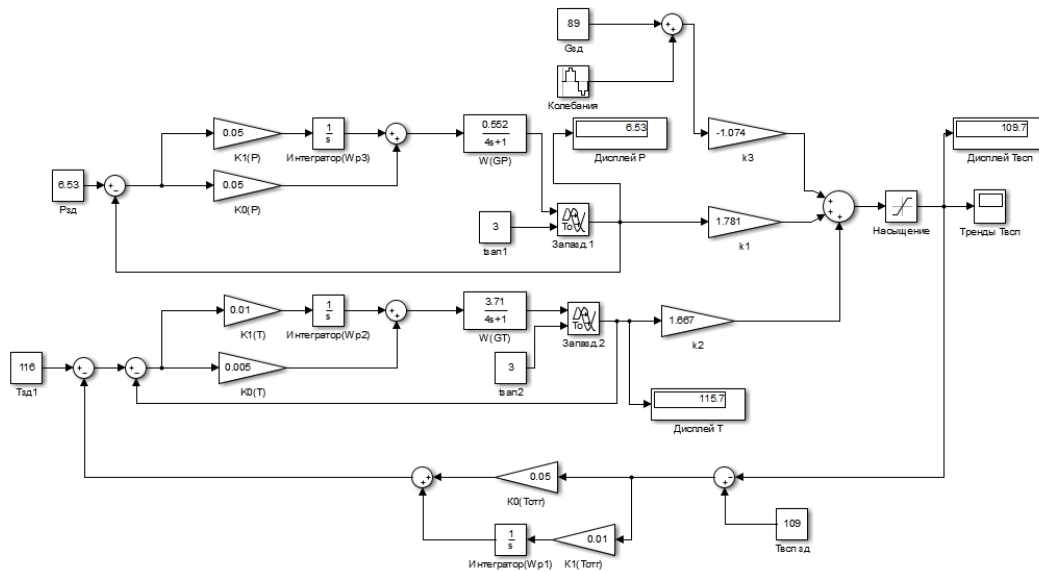


Рисунок 10. АСР по $T_{всп}$

Основные этапы проведения процедуры идентификации следующие:

- структурная идентификация, заключающаяся в определении структуры математической модели на основании теоретических соображений;
- параметрическая идентификация, включающая в себя проведение идентифицирующего эксперимента и определение оценок параметров модели по экспериментальным данным. Для получения экспериментальных данных по разработанным моделям применяется блок «То workspace» для вывода данных в рабочую среду Matlab;

– проверка адекватности – проверка качества модели в смысле выбранного критерия близости выходов модели и объекта.

После моделирования процесса применяется интерфейс «System Identification Toolbox».

Проводится идентификация модели с помощью структуры «Process model», позволяющая описывать процесс в виде передаточной функции, подбирать коэффициент усиления, постоянные времени и запаздывание заданной структуры модели.

Разработанная модель в среде Simulink и модель структуры «Process Model» сравниваются. Результаты сравнения представлены на рисунке 11.

Анализ результата сравнения переходных характеристик позволяют оценить разработанную модель. Результат идентификации возможно использовать для корректировки настроек регулятора.

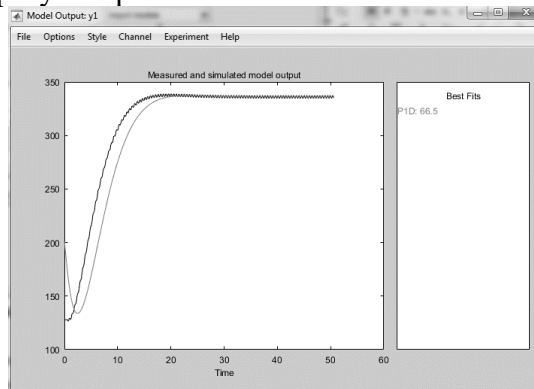


Рисунок 11. Результаты сравнения переходных характеристик

Проводится исследование системы управления по показателям качества на основе нейронных сетей и оценка данного управления. Было решено, что управлять процессом должен сам оператор, а нейронная сеть должна служить как экспертная система.

На разработку системы управления применяется трёхслойная нейронная сеть вида (3-3-2) с использованием алгоритма обратного распространения, где 3 входных параметра (давление верха колонны, температура верха колонны, расход ВЦО), скрытый слой и 2 выходных параметра (температура 95 % отгона, температура вспышки) [4]. Разработанная нейронная сеть представлена на рисунке 12.

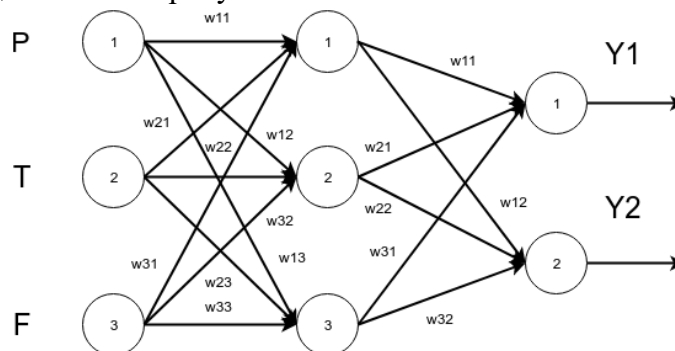


Рисунок 12. Нейронная сеть управления по ПК

Взвешенная сумма входов нейрона скрытого слоя и выходного параметра соответственно имеют вид

$$S_j^1 = \sum_{i=1}^3 x_i \cdot w_{ij}, j \in [1,2,3], \tag{16}$$

$$s_k^2 = \sum_{i=1}^3 u_j \cdot w_{jk}, k \in [1,2]. \tag{17}$$

Преобразование S происходит по сигмоидной (логистической) функции активации имеет вид [5]

$$u_j = \frac{1}{1 + e^{-s_j \cdot 0,1}}, j \in [1,2,3]. \tag{18}$$

Выходной параметр сети определяется по формуле

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-u_k \cdot 0,1}}, k \in [1,2]. \tag{19}$$

Поскольку входные параметры взаимосвязаны, то изменение первого влечет за собой изменение других. В данном случае изменение температуры верха колонны влечёт изменение давления верха колонны и расхода верхнего циркуляционного орошения.

Для получения взаимосвязи входных параметров нейронной сети управления по показателям качества строится вторая нейронная сеть зависимости входных данных друг от друга. Данная нейронная сеть изображена на рисунке 13.

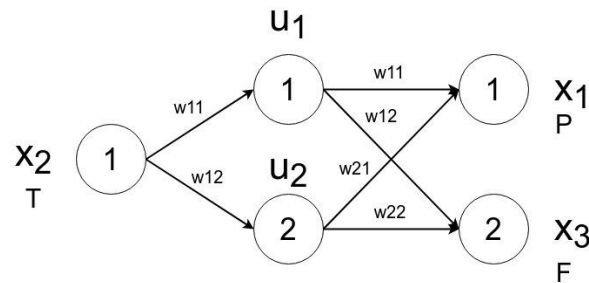


Рисунок 13. Нейронная сеть связи зависимости входных данных друг от друга

Взвешенные суммы входов нейрона скрытого слоя для данной нейронной сети определяется по формуле

$$S_1^0 = \frac{1}{1 + e^{-w_{11}^0 \cdot x_2 \cdot 0,1}}, \tag{20}$$

$$S_2^0 = \frac{1}{1 + e^{-w_{12}^0 \cdot x_2 \cdot 0,1}}. \tag{21}$$

Выходы нейронной сети описываются уравнением

$$x_1 = \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{11}^1 \cdot u_1 + w_{21}^1 \cdot u_2)}}, \tag{22}$$

$$x_3 = \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{21}^1 \cdot u_1 + w_{22}^1 \cdot u_2)}}. \tag{23}$$

При взаимодействии нейронной сети управления по показателям качества и связи зависимости входных данных друг от друга производится слияние формул (16), (17), (22), (23).

При наличии связи между двумя нейронными сетями взвешенная сумма входов нейрона скрытого слоя и выходного параметра имеет вид

$$S_j^* = \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{11}^1 \cdot u_1 + w_{21}^1 \cdot u_2)}} \cdot w_{1j} + x_2 \cdot w_{2j} + \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{21}^1 \cdot u_1 + w_{22}^1 \cdot u_2)}} \cdot w_{3j}. \tag{24}$$

Значение функции активации скрытого слоя нейронной сети управления по ПК определяется по формуле

$$u_j^* = \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{11}^1 \cdot u_1 + w_{21}^1 \cdot u_2)}} \cdot w_{1j} + x_2 \cdot w_{2j} + \frac{1}{1 + e^{-0,1 \cdot (w_{21}^1 \cdot u_1 + w_{22}^1 \cdot u_2)}} \cdot w_{3j} \right)}}} \quad (25)$$

На основе весов обученной сети возможно создание задания по выходному значению показателя качества.

Принципиальное значение ошибки задания выходного параметра от входных имеет вид

$$\Delta Y_i = Y_{i(\text{нов})} - Y_i. \quad (26)$$

Реализация системы управления по показателям качества осуществляется программой, созданная в программном пакете Qt Creator 4.6.1 на языке C++ [6]. Обучение проводится по статистическим данным, упомянутые ранее (таблица 1).

Работа программы осуществляется следующим образом. Полученные с установки технологические параметры вносятся в программу, где производится расчёт выходных данных. При необходимости оператор отправляет запрос для получения рекомендации по изменению определённого технологического параметра. Результат запроса является окно с информацией о необходимых корректировках.

Реализация процесса представлена на рисунке 14.

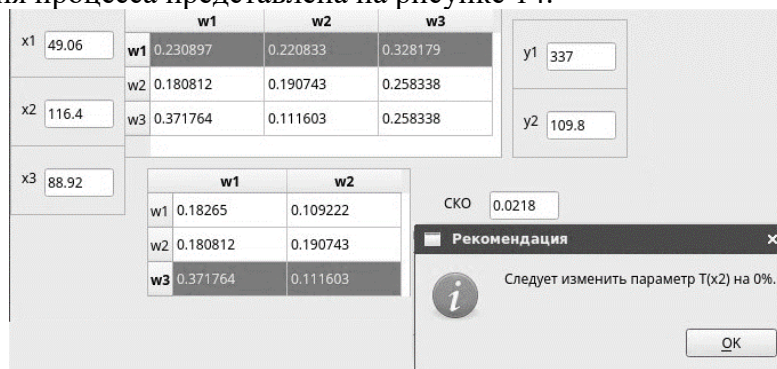


Рисунок 14. Реализация разработанной нейронной сети

Результаты и обсуждение

Полученная модель может быть использована в системах управления технологическим процессом как прогнозирующая модель параметров режима, а также в качестве тренажера в системах обучения технологического персонала.

При исследовании и разработки системы управления по показателям качества на основе нейронных сетей пришли к выводу, что наличие более детальной статистики возможна реализация разработанной системы управления. Улучшение систем управления актуально, поскольку это позволит повысить быстродействие и улучшит эффективность управления. Результаты моделирования и оценочные данные выявляют, что использование данного подхода управления технологического процесса позволит снизить потери на 2-5 %, что позволит окупить применение технического решения за полгода. Применение данной системы управления возможно на других установках нефтехимического производства.

Практическая значимость результатов работы состоит в возможности применения разработки на практике в процессе обучения с иностранными студентами, поскольку Уфимский государственный нефтяной технический университет осуществляет сотрудничество с зарубежными университетами, компаниями, предприятиями стран Европы, Азии, СНГ. При заинтересованности в развитии разработки возможно проведение совместной работы по модернизации системы управления по показателям качества между странами ЕАЭС или с третьими странами, что позволяет развивать евразийскую интеграцию и углублять сотрудничества ЕАЭС с третьими странами.

Список литературы

1. Веревкин, А.П. Автоматизация технологических процессов и производств в нефтепереработке и нефтехимии / А.П. Веревкин, О.В. Кирюшин – Уфа: УГНТУ, 2005 – 172 с.
2. Аязян, Г.К. Основы автоматического регулирования [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / Г. К. Аязян, Е. В. Таушева. - Уфа : ФГБОУ ВПО УГНТУ : ССП УГНТУ "ИДПО", 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
3. Дьяконов, В.П. Matlab: анализ, идентификация и моделирование систем: спец. справочник / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов – СПб: Питер, 2001 – 441 с.
4. Веревкин, А.П. Автоматизация технологических процессов и производств в нефтепереработке и нефтехимии / А.П. Веревкин, О.В. Кирюшин – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – 171 с.
5. Муртазин, Т.М. Конспект лекций по курсу «Математические основы искусственного интеллекта» / Т.М. Муртазин –Уфа: Издательство УГНТУ, 2016 – 57 с.
6. Qt documentation [Электронный ресурс]. Май 2018 – Режим доступа: <http://doc.qt.io> (дата обращения: 29.08.2018).