

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ НЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ РЕФЕРЕНСНОЙ МОДЕЛИ И ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

С. Д. Фарунцев (ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»)

Предложено использование аналитико-экспериментальных ячеечных моделей для синтеза систем нейро управления подогревателями нефтяной эмульсии. Описана методология режимной настройки референсной модели подогрева эмульсии в аппарате ПТБ-10Э. Приведены варианты схем управления подогревателем с использованием разработанной модели и нейроконтроллеров. Сформулирован вывод о целесообразности продолжения работ в области математического моделирования и разработки схем усовершенствованного и интеллектуального управления для объектов подготовки нефти современных нефтегазовых месторождений и, в частности, для подогревателей нефтяной эмульсии.

**Ключевые слова:** подогреватель нефтяной эмульсии, возмущающие факторы, режимная настройка референсной модели управления, искусственные нейронные сети и нейроконтроллеры, системы усовершенствованного и интеллектуального управления подогревателем.

### Введение

Существующие условия эксплуатации объектов подготовки нефти нефтегазовых месторождений, характеризующиеся интенсивным фоном возмущающих воздействий (по количеству и качеству эмульсии, поступающей со скважин к объектам подготовки нефти, ее химическому составу, влаге-, газо- и солесодержанию, температуре, давлению, вязкости и др.), при недостатке или отсутствии оперативных измерителей многих из перечисленных параметров стимулируют повышение интереса исследователей к разработке и внедрению на месторождениях систем оптимизации, усовершенствованного и интеллектуального управления, позволяющих добиться увеличения эффективности, стабильности процессов добычи, сепарации и подготовки нефтяной эмульсии к транспортировке в условиях действия интенсивного фона возмущений [1-3].

Центральное место в технологической цепочке установки подготовки нефти (УПН) современного нефтегазового месторождения занимают подогреватели нефтяной эмульсии, так как именно от температуры подогрева зависят важнейшие показатели эффективности процессов газовой сепарации и обезвоживания эмульсии [4]. Перегрев эмульсии, вследствие неустойчивости поддержания ее температуры при действии возмущений, приводит к перерасходу топливного газа и, что более важно, уходу из нефти с попутными нефтяными газами ценных легких углеводородов так называемой «широкой фракции легких углеводородов».

В настоящей работе приводятся результаты разработки и режимной настройки аналитико-экспериментальной модели трубчатой блочной печи подогрева нефтяной эмульсии ПТБ-10Э. Проиллюстрирована возможность использования данного способа моделирования для синтеза систем усовершенствованного и интеллектуального управления. Приведены примеры построения моделей подобных систем с использованием искусственных нейронных сетей и нейроконтроллеров. Указаны характеристики качества регулирования процесса подогрева нефтяной эмульсии, которые могут быть достигнуты

реальными системами усовершенствованного и интеллектуального управления в условиях действия возмущений.

### Разработка и режимная настройка модели подогревателя ПТБ-10Э по данным эксплуатации

Блочные трубчатые печи ПТБ-10Э широко используются на современных российских месторождениях нефти и газа. Процесс подогрева эмульсии нефти в них происходит в теплообменных камерах, состоящих из радиационно-конвекционной и конвекционной секций, через которые проходит система змеевиков-трубопроводов с движущейся эмульсией. Сжигание газа происходит в камерах сгорания. Воздух, необходимый для сгорания газа, принудительно подается от воздуходувок, подающих воздух в необходимом соотношении с газом. Нефтяной топливный газ поступает к горелкам, смешивается с воздухом и сгорает (<http://dznm.ru/products/pechi/ptb-10ae>).

Для построения модели выбрана методология комбинированного аналитико-экспериментального моделирования, которая предусматривает рассмотрение режимных параметров и базисных соотношений, отражающих основные гидродинамические и физико-химические процессы, происходящие в объекте управления, при этом коэффициенты уравнений гидродинамики, тепло- и/или массопередачи подстраиваются методами статистики под режимные условия эксплуатации реального аппарата и его конструктивные характеристики.

Процедура построения математической модели подогревателя ПТБ-10А, основанной на методологии ячеечного моделирования, а также результаты расчетов описаны в [5]. Там же показано, что тип ячеечной модели удачно сочетается с современным способом модельно-ориентированного проектирования систем управления [6], известными представителями которых являются продукты MATLAB/Simulink и SimInTech (<http://help.simintech.ru/>). Это дает основание принять технологию построения эталонных моделей на основе ячеечного моделирования, реализованную средствами модельно-ориентированного проектирования, в качестве действенного инстру-

ментария для синтеза систем усовершенствованного и интеллектуального управления объектами нефтедобычи.

На рис. 1 изображена схема ячейочной модели подогревателя ПТБ-10Э, принятая в рассматриваемом случае. Согласно модели, один из потоков теплоносителя (газы сгорания) моделируется с использованием ячеек идеального смешения — по одной на каждую секцию. Второй поток нефтяной эмульсии в трубопроводе несет черты модели вытеснения, которая с большой степенью приближения может быть описана последовательностью  $n+m$  ячеек идеального смешения ( $n$  для радиационно-конвекционной,  $m$  — для конвекционной секции).

Математическое описание ячейочной модели представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Уравнения включают зависимости температуры газа в секциях теплообменной камеры, температуры эмульсии в ячейках трубопровода и температуры участков металлических стенок ячеек, систему уравнений зависимости влагосодержания эмульсии по ячейкам от степени ее подогрева, а также набор зависимостей отдельных параметров модели — плотности, теплоемкости воды, нефти и др. от температуры.

Для целей режимной настройки модели был получен набор усредненных массивов исторических параметров, снятых в процессе запуска реального подогревателя ПТБ-10Э на одном из нефтегазовых месторождений Западной Сибири, представленный в первых пяти столбцах таблицы (данные предоставлены ООО «Инсист Автоматика»).

Отметим, что среди экспериментальных данных отсутствует информация по многим показателям, оказывающим существенное влияние на результаты расчетов, среди которых температура окружающей среды, влагосодержание эмульсии, а также данные по составу или относительной плотности топливного газа, коэффициенту избытка воздуха по отношению к топливному газу, что не могло не сказаться на точности моделирования. В связи с этим имеющаяся информация была дополнена усредненными оценками соответствующих показателей, в частности, показателями влагосодержания эмульсии и относительной доли безвозвратных тепловых потерь, значения которых указаны в последних двух столбцах таблицы.

Процедура режимной идентификации осуществлялась путем решения оптимизационной задачи минимизации целевой функции *Delta*:

$$\Delta = \sum_{j=1}^N \left[ \lambda \cdot \left( \frac{T_{em\ out(j)} - T_{em\ out(j)}^{real}}{T_{em\ out(j)}^{real}} \right)^2 + (1 - \lambda) \cdot \left( \frac{\eta_{em(j)} - \eta_{gas(j)}}{\eta_{em(j)}} \right)^2 \right] \Rightarrow \min \quad (1)$$

где  $T_{em\ out(j)}^{real}$  — рассчитанное в  $j$ -м опыте, ( $N$  — число строк таблицы) значение температуры эмульсии на выходе подогревателя, °C;  $T_{em\ out(j)}$  — фактическое в  $j$ -м опыте значение температуры эмульсии на выходе подогревателя, °C;  $\eta_{em(j)}$  — рассчитанное в  $j$ -м опыте значение КПД подогревателя по соотношению

тепла, потраченного на нагрев эмульсии, и тепла, выделившегося при сгорании топливного газа, %;  $\eta_{gas(j)}$  — рассчитанное в  $j$ -м опыте значение КПД подогревателя по соотношению температуры газов горения, температуры дымовых газов и доли безвозвратных потерь тепла из подогревателя;  $\lambda$  — коэффициент, задающий значимость отдельных составляющих целевой функции,  $0 \leq \lambda \leq 1$ .

Первый член функции *Delta* отвечает за минимизацию разницы между расчетными и фактическими значениями температуры эмульсии на выходе подогревателя, второй — за общую корректность модели, так

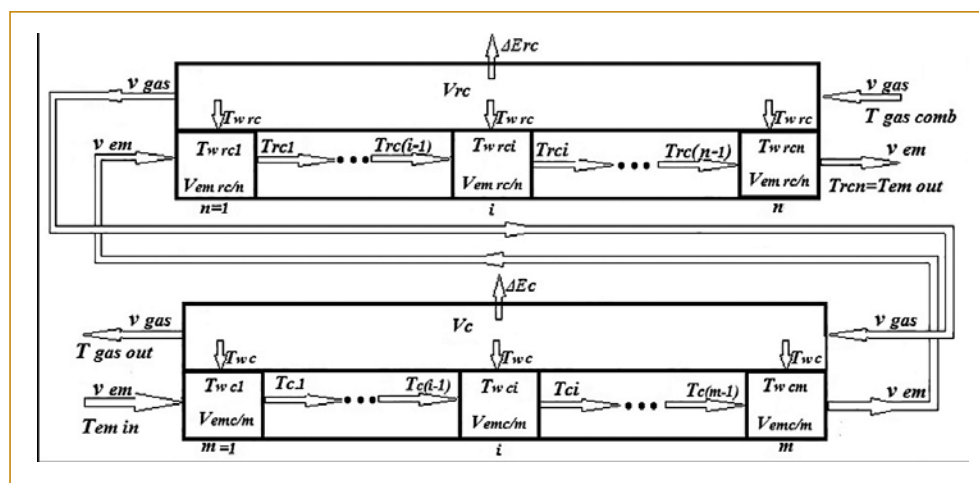


Рис. 1. Схема ячейочной модели подогревателя ПТБ-10Э, где  $T_{gas\ comb}$ ,  $T_{gas\ out}$  — температура газов сгорания на входе/выходе в теплообменную камеру;  $V_{rc}$ ,  $V_c$  — объемы радиационно-конвекционной и конвекционной секций;  $v_{gas}$  — объемный расход газов;  $v_{em}$  — объемный расход эмульсии;  $T_{em\ in}$ ,  $T_{em\ out}$  — температура эмульсии нефти на входе/выходе в подогреватель;  $V_{em\ rc}$ ,  $V_{em\ c}$  — суммарный объем системы трубопроводов радиационно-конвекционной и конвекционной секций;  $T_{w\ rc\ i}$ ,  $T_{w\ c\ i}$  — температура металлической стенки  $i$ -й ячейки радиационно-конвекционной и конвекционной секций;  $T_{rc\ (i-1)}$ ,  $T_{rc\ i}$  — температура эмульсии нефти на входе/выходе в  $i$ -ю ячейку радиационно-конвекционной секции;  $T_{c\ (i-1)}$ ,  $T_{c\ i}$  — температура эмульсии нефти на входе/выходе в  $i$ -ю ячейку конвекционной секции;  $n$ ,  $m$  — число ячеек радиационно-конвекционной и конвекционной секций;  $\Delta E_{rc}$  и  $\Delta E_c$  — безвозвратные потери тепла

Таблица. Данные режимной настройки модели подогревателя

| №  | $T_{em\ in},$<br>°C | $G_{em},$<br>м³/ч | $V_{gas},$<br>м³/ч | $T_{em\ out}^{real},$<br>°C | $T_{em\ out},$<br>°C | $\Delta T_{em},$<br>°C | $W_{em},$<br>% | $\delta E$ |
|----|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|----------------|------------|
| 1  | 20                  | 206,4             | 244                | 30,4                        | 30,60                | -0,20                  | 30             | 0,40       |
| 2  | 18                  | 202,0             | 289                | 30,9                        | 30,73                | 0,17                   | 30             | 0,40       |
| 3  | 20                  | 296,3             | 244                | 28,5                        | 28,55                | -0,05                  | 30             | 0,35       |
| 4  | 21                  | 307,1             | 289                | 32,1                        | 31,59                | 0,51                   | 30             | 0,25       |
| 5  | 19                  | 286,1             | 334                | 33,6                        | 33,19                | 0,41                   | 30             | 0,25       |
| 6  | 18                  | 510,3             | 514                | 32,1                        | 32,74                | -0,64                  | 30             | 0,15       |
| 7  | 20                  | 507,6             | 559                | 35,4                        | 36,01                | -0,61                  | 30             | 0,15       |
| 8  | 20                  | 500,9             | 604                | 38,6                        | 38,61                | -0,01                  | 30             | 0,10       |
| 9  | 21                  | 485,3             | 649                | 40,7                        | 41,40                | -0,70                  | 30             | 0,10       |
| 10 | 20                  | 512,6             | 694                | 41,6                        | 40,70                | 0,90                   | 30             | 0,10       |

Обозначения:  $T_{em\ in}$  – температура эмульсии на входе,  $G_{em}$  – расход эмульсии,  $V_{gas}$  – расход топливного газа,  $T_{em\ out}^{real}$  – температура эмульсии на выходе,  $T_{em\ out}$  – расчетное значение температуры эмульсии на выходе,  $\Delta T_{em}$  – разница между расчетным и фактическим значениями температуры эмульсии на выходе,  $W_{em}$  – влагосодержание эмульсии,  $\delta E$  – относительная доля безвозвратных тепловых потерь.

как оба значения КПД  $\eta_{gas(j)}$  и  $\eta_{em(j)}$  должны совпадать, что служит критерием корректности настройки коэффициентов разработанной модели.

Функциональные зависимости, вытекающие из уравнений модели:

$$\begin{aligned} T_{em(j)} &= f(\alpha_{em}, \alpha_{gas}, \varepsilon_r, \beta); \\ \eta_{gas(j)} &= f(\alpha_{em}, \alpha_{gas}, \varepsilon_r, \beta); \\ \eta_{em(j)} &= f(\alpha_{em}, \alpha_{gas}, \varepsilon_r, \beta); \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_r$  – поправочный коэффициент уравнения радиационного теплообмена, Вт/(м²·К⁴);  $\beta$  – соотношение радиационного и конвективного теплообмена в теплообменной камере, отн. ед.;  $\alpha_{gas}$  – коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубопровода, Дж/(с·м²·К);  $\alpha_{em}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки трубопровода к эмульсии, Дж/(с·м²·К).

На каждую из поисковых независимых переменных оптимизационной задачи  $\alpha_{em}, \alpha_{gas}, \varepsilon_r, \beta$  наложены позиционные ограничения по допустимым минимальному и максимальному значениям:

$$\begin{aligned} \alpha_{em}^{min} &\leq \alpha_{em} \leq \alpha_{em}^{max}; \\ \alpha_{gas}^{min} &\leq \alpha_{gas} \leq \alpha_{gas}^{max}; \\ \varepsilon_r^{min} &\leq \varepsilon_r \leq \varepsilon_r^{max}; \\ \beta^{min} &\leq \beta \leq \beta^{max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, рассматривались ограничения, отвечающие за поддержание расчетных значений КПД подогревателя выше минимально допустимых значений:

$$\eta_{em(j)} \geq \eta_{min} \quad \text{и} \quad \eta_{gas(j)} \geq \eta_{min}, \quad (4)$$

где  $\eta_{min}$  – минимальное значение КПД, заданное производителем подогревателя модификации ПТБ-10Э.

В результате решения задачи оптимизации получены численные значения искомых переменных:  $\alpha_{gas}, \alpha_{em}, \varepsilon_r$  и  $\beta$ . В столбце  $T_{em\ out}$  таблицы приведены расчетные значения температуры эмульсии на выходе подогревателя, а в столбце  $\Delta T_{em}$  указана разница расчетных и фактических значений.

Согласно данным таблицы, выдерживается соответствие между расчетными и фактическими значениями температуры эмульсии на выходе подогревателя. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составляет величину 0,54°C, что свидетельствует об удовлетворительном результате режимной настройки статистики модели, согласно дан-

ным реальным измерениям и с учетом принятых допущений о численных значениях параметров, не указанных в таблице.

Для проверки динамических свойств модели проведено ее сопоставление с реальными данными. Рис. 2 иллюстрирует графики изменения расходов топливного газа, эмульсии нефти и температуры эмульсии на входе подогревателя в процессе разогрева подогревателя; а рис. 3 – соотношение расчетных значений температуры эмульсии на выходе подогревателя (сплошная линия) и реальных (пунктирная линия) в процессе его разогрева (данные предоставлены ООО «Инсист Автоматика»). Нижний экран рис. 3 представляет график изменения доли безвозвратных потерь, учтенных моделью.

Пунктирная и сплошная линии верхнего экрана графиков рис. 3 местами почти совпадают, хотя на иных участках наблюдается сдвиг по фазе между ними вследствие неких неучтенных факторов.

В итоге результаты режимной настройки статистики модели подогревателя ПТБ-10Э и проверки ее динамических свойств по данным фактических измерений продемонстрировали гибкость модели, ее способность учитывать детали изменения технологического режима и возмущающих воздействий, что позволяет использовать модель для построения систем усовершенствованного и интеллектуального управления.

**Примеры схем усовершенствованного и интеллектуального управления трубчатым подогревателем эмульсии нефти, сформированных с использованием разработанной модели**

Прежде всего, необходимо указать, что наличие модели, адекватно отражающей статические и динамические свойства объекта управления (референс-

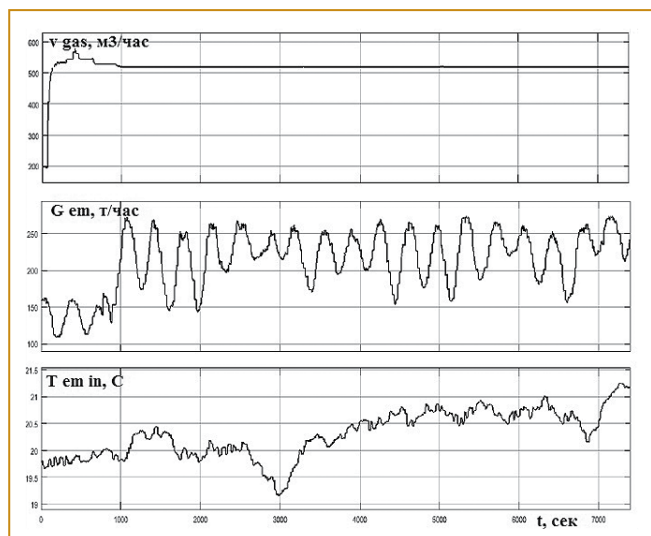


Рис. 2. Графики изменения расходов топливного газа ( $V_{gas}$ ), эмульсии нефти ( $G_{em}$ ) и температуры эмульсии на входе подогревателя ( $T_{em\ in}$ ) в процессе разогрева подогревателя

ной модели), предоставляет исследователю самые широкие возможности как для совершенствования существующих методов и алгоритмов, так и для синтеза принципиально новых «интеллектуальных» решений в области управления и регулирования. Хотя различие между понятиями «усовершенствованной» и «интеллектуальной» системами достаточно условное. Под усовершенствованными в настоящем рассмотрении понимаются системы, построенные на традиционных средствах ПИД-регулирования, но в схемы которых внесены модификации, улучшающие качество регулирования. Под интеллектуальными понимаются системы, построенные на качественно иной математической и программно-технической основе, хотя в составе интеллектуальных систем могут использоваться и традиционные средства. В следующем разделе будут представлены примеры совершенствования традиционных систем ПИД-регулирования и разработки системы интеллектуального управления подогревателем эмульсии нефти с использованием методологии искусственных нейронных сетей.

#### Схема супервизорного нейро-ПИД-управления подогревателем

Одним из вариантов усовершенствованного управления подогревателем является супервизорный режим управления ПИД-регулятором, при котором супервизор следит за текущим состоянием какого-либо важного параметра, связанного с объектом управления, и оперативно корректирует настройки ПИД-регулятора. В предлагаемой схеме в качестве супервизора выступает искусственная нейронная сеть (ИНС), а в качестве контролируемого параметра рассматривается среднее время пребывания эмульсии нефти в трубопроводе:

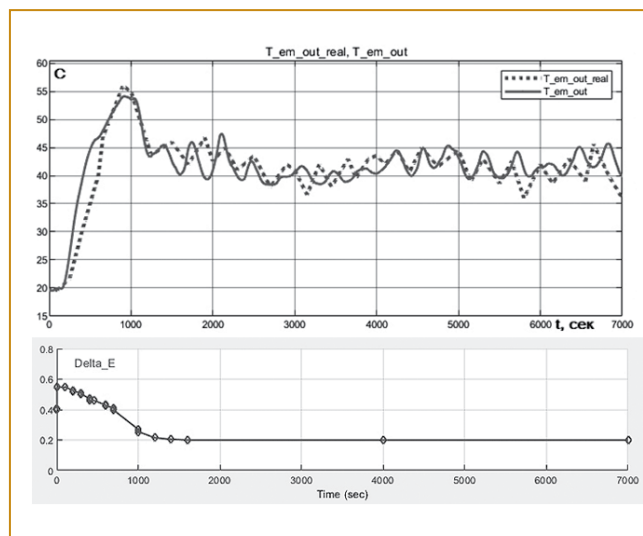


Рис. 3. Графики изменения фактического ( $T_{em\ out\ real}$ ) и расчетного ( $T_{em\ out}$ ) значений температуры эмульсии на выходе подогревателя (верху) и доли безвозвратных потерь ( $\Delta E$ ) в процессе разогрева подогревателя (внизу)

$$\tau_{resid} = \frac{V}{v_{em}} = \frac{V \cdot \rho_{em}}{G_{em}},$$

где  $\tau_{resid}$  – среднее время пребывания эмульсии, с;  $V$  – суммарный объем внутреннего пространства трубопровода эмульсии, м³;  $v_{em}$  – объемный расход эмульсии нефти в подогреватель, м³/с;  $\rho_{em}$  – плотность эмульсии в подогревателе, кг/м³. При этом ИНС обучена выдавать на выходе численные значения оптимальных настроек в зависимости от рассчитанного значения среднего времени пребывания эмульсии.

Физический смысл данного типа управления состоит в том, что с увеличением расхода эмульсии (и уменьшением среднего времени пребывания) существенно возрастают скорости гидродинамических и тепловых процессов, что требует повышения оперативности регулирования, его «агрессивности», выражающейся в увеличении численных значений настроек регулятора.

На рис. 4 изображены графики рассчитанных оптимальных значений  $P$ -,  $I$ -,  $D$ -,  $N$ - настроек ПИД-регулятора в зависимости от среднего времени пребывания эмульсии нефти в трубопроводе подогревателя.

Передаточная функция ПИД-регулятора в рассматриваемом случае выражается зависимостью:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}}, \quad (4)$$

где  $y(s)$ ,  $x(s)$  – выходная/входная переменная регулятора,  $s$  – аргумент преобразования Лапласа,  $P$  – пропорциональная составляющая,  $I$  – интегральная составляющая,  $D$  – дифференциальная состав-



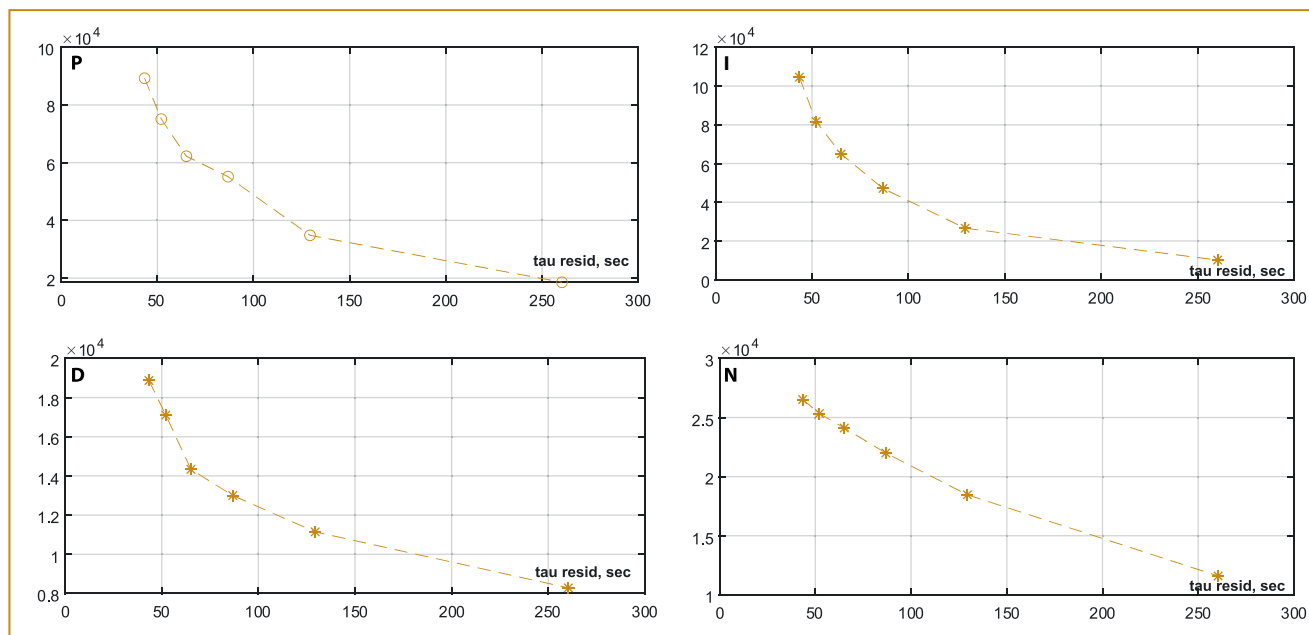


Рис. 4. Графики значений оптимальных  $P$ -,  $I$ -,  $D$ -,  $N$ -настроек ПИД-регулятора в зависимости от среднего времени пребывания эмульсии  $\tau_{resid}$

ляющая,  $N$  — коэффициент фильтра дифференциальной составляющей.

На рис. 5 изображена схема искусственной нейронной сети, лежащей в основе супервизорного блока коррекции ПИД-регулятора. ИНС имеет один вход (*Input*), на который поступают значения среднего времени пребывания эмульсии  $\tau_{resid}$  и выход (*Output*), представляющий собой вектор из четырех параметров  $P$ ,  $I$ ,  $D$  и  $N$  рассчитанных оптимальных значений настроек регулятора. Нейронная сеть имеет два слоя: входной слой (*Hidden Layer*) составлен из четырех нейронов с нелинейными (сигмоидными) функциями активации, выходной слой (*Output Layer*) включает четыре выходных нейрона (по размерности выхода) с линейными функциями активации.

Схема модели усовершенствованного управления подогревателем ПТБ-10Э на основе ПИД-регулятора с коррекцией уставок от нейронного супервизора (рис. 6) включает подсистему *PTB-10E* референсной модели подогревателя ПТБ-10Э, подсистему *Subs\_NN\_Tune\_PID* супервизорного ПИД-регулирования, подсистему *Subs\_Data\_Gen* генератора сигналов, подсистему *Subs\_To\_Workspace* передачи значений выходной переменной  $T_{em\_out}$  и заданного значения температуры  $T_{em\_out\_Set}$  в рабочее пространство для последующей статистической обработки.

Схема подсистемы *Subs\_NN\_Tune\_PID* супервизорного ПИД-регулирования (рис. 7) включает блок *NN\_PID\_Supervisor* нейронного супервизора, структура которого соответствует рис. 5, блок *PID(s)* ПИД-регулятора с внешними настройками, подсистему фильтрации *Subs\_Filters*, сглаживающей значения корректируемых уставок перед подачей их ПИД-регулятору.

Нейронный супервизор получает на вход значение среднего времени пребывания, рассчитывает оптимальные значения уставок и выдает их через блок фильтров на входы ПИД-регулятора, который получает также сигнал рассогласования, равный  $e = T_{em\_Set} - T_{em\_out}$ , рассчитывает результирующее воздействие в виде сигнала расхода топливного газа  $v_{gas\_PID}$ , которое подается на выход подсистемы  $v_{gas\_out}$ .

Схема подсистемы генератора сигналов *Subs\_Data\_Gen* показана на рис. 8. В рассматриваемом случае генератор сигналов выдает по каналу  $G_{em}$  расхода эмульсии линейно убывающий сигнал от максимального (650 т/ч) до минимального (100 т/ч) в течение интервала моделирования (12 тыс. с). На линейный сигнал наложены ступенчатые возмущения от генератора случайных сигналов (ГСЧ). По каналам сигналов  $W_{em}$  влагосодержания эмульсии и  $T_{em\_in}$  температуры эмульсии на входе подогревателя также генерируются периодические сигналы прямоугольной формы, амплитуда которых задается ГСЧ (рис.9, слева). На рис. 9 справа изображены графики реакции системы на указанные воздействия.

Графики оптимальных значений уставок ПИД-регулятора, передаваемых на его вход от супервизора в процессе регулирования, изображены на рис. 10.

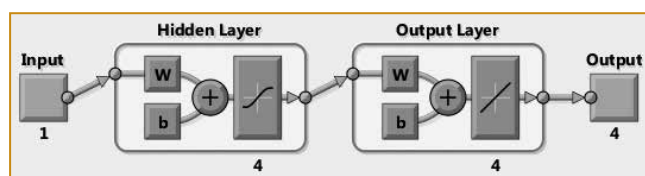


Рис. 5. Схема искусственной нейронной сети, лежащей в основе блока коррекции ПИД-регулятора

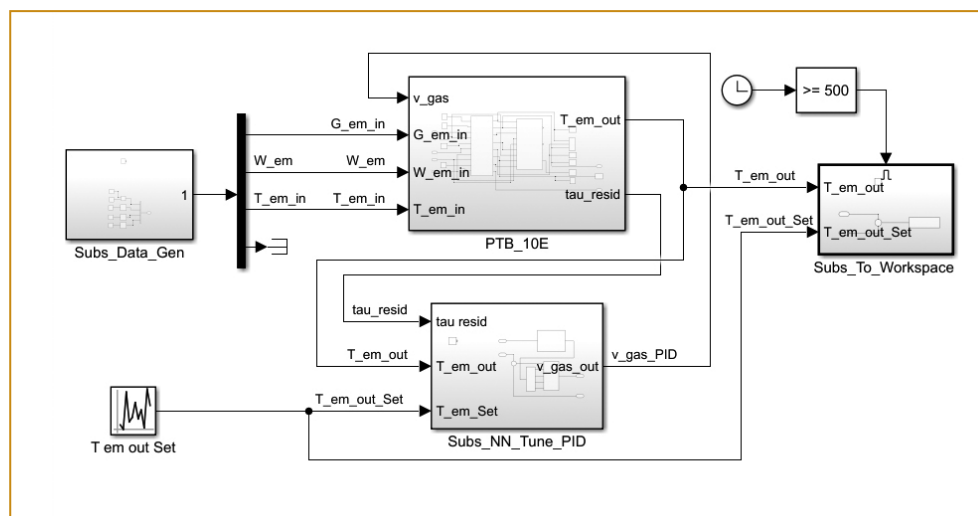


Рис. 6. Схема модели супервизорного нейро-ПИД-управления подогревателем

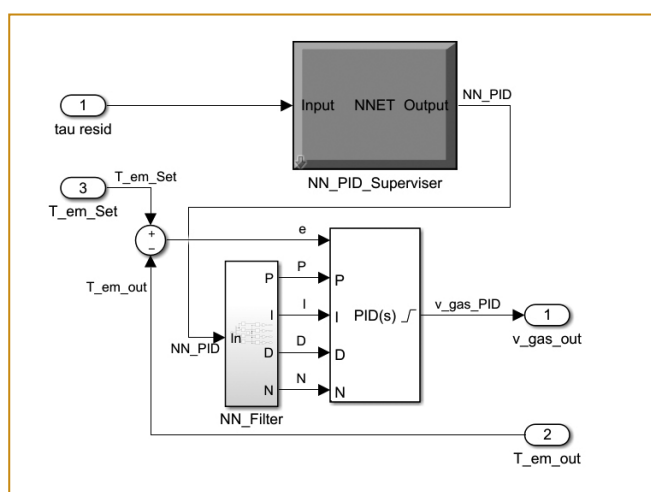


Рис. 7. Схема подсистемы Subs&gt;NN\_Tune\_PID супервизорного ПИД-регулирования

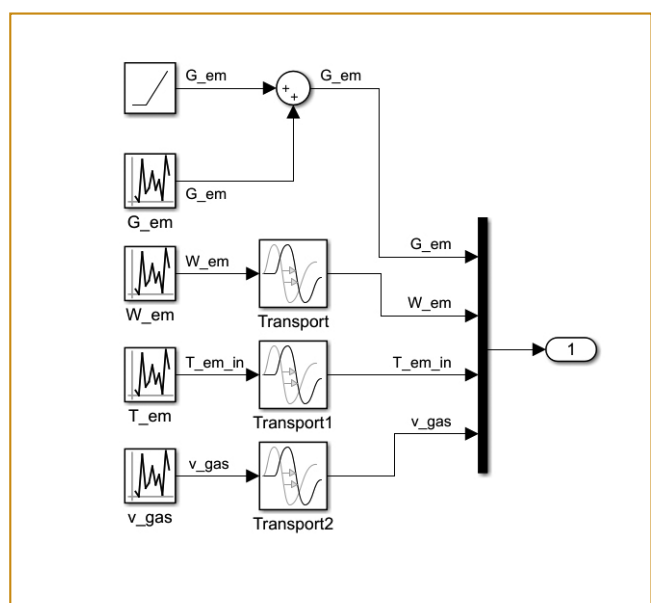


Рис. 8. Схема подсистемы генератора сигналов Subs\_Data\_Gen

Качество регулирования схемы, оцениваемое по величинам дисперсии  $\sigma^2$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma$  значения температуры эмульсии от заданного значения, для рассматриваемого случая составило  $T_{em\_out} = 50^\circ\text{C} \pm \Delta$ , где  $\Delta = 3\sigma = 2,97^\circ\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 0,99$ .

### Схема прямого инверсного нейруправления подогревателем

Для построения инверсного нейроэмулятора, согласно идее метода *инверсно-прямого нейруправления* [7], в режиме «учителя» в рассматриваемом случае используется имеющаяся референсная модель объекта управления. При этом проблема построения инверсного нейрорегулятора рассматривается как задача синтеза обратной модели объекта (рис. 11), где  $g(t)$  – задающее воздействие,  $y(t)$  – выходная (регулируемая) переменная. Если  $F$  – оператор объекта, а  $F^{-1}$  – оператор регулятора, то при любых условиях должно выполняться равенство

$$y(t) = g(t) \cdot F^{-1} \cdot F = g(t). \quad (5)$$

Если  $W(s)$  – передаточная функция объекта, то для обратной модели  $W_{inv}(s)$  в динамике должно выполняться условие:

$$W(s) \cdot W_{inv}(s) = 1. \quad (6)$$

В реальных условиях точное получение обратной модели объекта связано со значительными трудностями и часто недостижимо. Во-первых, для статики объекта выполнение условия (5) приводит к требованию, чтобы функциональная зависимость  $y=f(g)$  при любых условиях имела монотонный характер. Во-вторых, для выполнения условия (6) передаточная функция  $W_{inv}(s)$  должна быть минимально-фазовой [8], то есть все корни (полюса и нули) характеристического полинома передаточной функции должны быть расположены в левой полуплоскости.

В рассматриваемом случае инверсный нейроэмулятор реализован в статическом варианте. Предварительные исследования показали, что прямая функция  $T_{em\_out}(v_{gas})$  зависимости выходной величины от входной является монотонно возрастающей при любых комбинациях прочих параметров модели, то есть требование (5) выполняется. Принятое упрощение (отказ от динамического нейроэмулятора) связано с большой проблематичностью обучения инверсных динамических нейронных сетей, для которых наряду

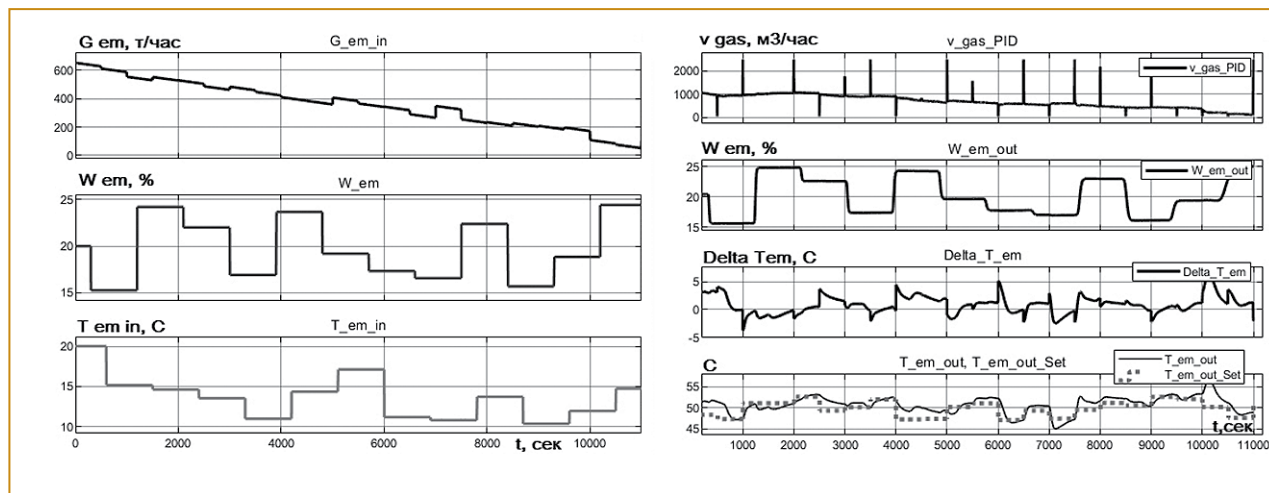


Рис. 9. Графики входных (слева) и выходных (справа) сигналов, где  $W_{em}$  – влагосодержание эмульсии,  $G_{em}$  – расход эмульсии,  $T_{em\_in}$  и  $T_{em\_out}$  – температура эмульсии на входе и выходе,  $T_{em\_Set}$  – уставка регулятора температуры эмульсии,  $v_{gas}$  – расход топливного газа в подогреватель,  $\Delta T_{em}$  – значение разницы между параметрами  $T_{em\_out}$  и  $T_{em\_Set}$

с точностью должно также выполняться требование устойчивости.

Схема подготовки обучающей статистики для тренировки искусственной нейронной сети показана на рис. 12. Генератор сигналов *Subs\_Data\_Gen* (рис. 8) выдает набор сигналов, который поступает на вход модели подогревателя. Одновременно из данного набора три первые составляющие  $G_{em}$ ,  $W_{em}$ ,  $T_{em\_in}$  объединяются с выходной переменной  $T_{em\_out}$  температуры эмульсии на выходе подогревателя и передаются в рабочую область в виде вектора входных переменных *out.Inputs*. Входная переменная расхода топливного газа в данной схеме играет роль выходной переменной будущего инверсного нейроэмулятора, поэтому эта переменная передается в рабочее пространство под именем *out.Output*.

Специальная программа (не показана) формирует из получившейся выборки статические значения, с помощью которых производится обучение ИНС. На

рис. 13 изображена схема искусственной нейронной сети, заложенной в основу блока инверсного нейроэмулятора.

Схема модели инверсного нейроуправления подогревателем ПТБ-10Э изображена на рис. 14.

Схема нейроконтроллера *Subs\_Inv\_NN\_Control* показана на рис. 15. На вход нейроконтроллера поступают три входные переменные  $G_{em}$ ,  $W_{em}$ ,  $T_{em\_in}$  и задание регулятору  $T_{em\_Set}$ . На выходе формируется значение переменной расхода топливного газа  $v_{gas}$ , которое должно обеспечить стабильное поддержание температуры эмульсии на выходе подогревателя при любой комбинации входных переменных, за счет чего и осуществляется процесс регулирования.

Графики сигналов в режиме проверки качества регулирования процесса инверсным нейроконтроллером показаны на рис. 16. Качество регулирования данной схемы составляет:  $T_{em\_out} = 50^\circ\text{C} \pm \Delta$ , где  $\Delta = 3\sigma = 1,09^\circ\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 0,131$ .

Достоинство рассмотренной схемы состоит в том, что она способна оперативно формировать выходное воздействие в виде сигнала расхода топливного газа, не дожидаясь реакции температуры эмульсии на выходе подогревателя, при любом изменении сигналов из перечня входных, то есть осуществлять компенсацию действия возмущений. Но необходимо иметь в виду, что схема прямого инверсного регулирования является разомкнутой (без обратной связи), то есть

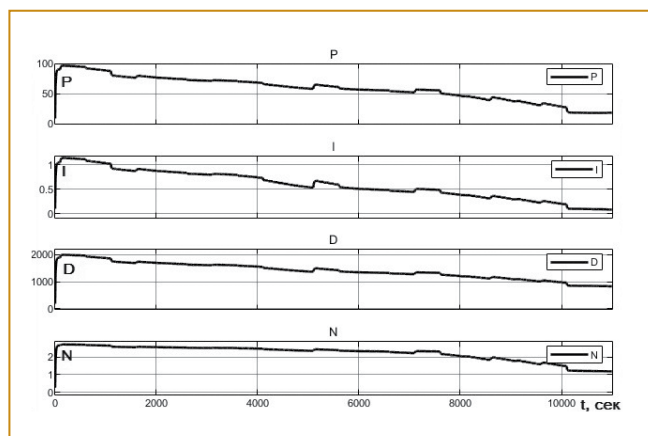


Рис. 10. Графики изменения оптимальных значений  $P$ ,  $I$ ,  $D$  и  $N$  уставок ПИД-регулятора



Рис. 11. Идеализированная система управления

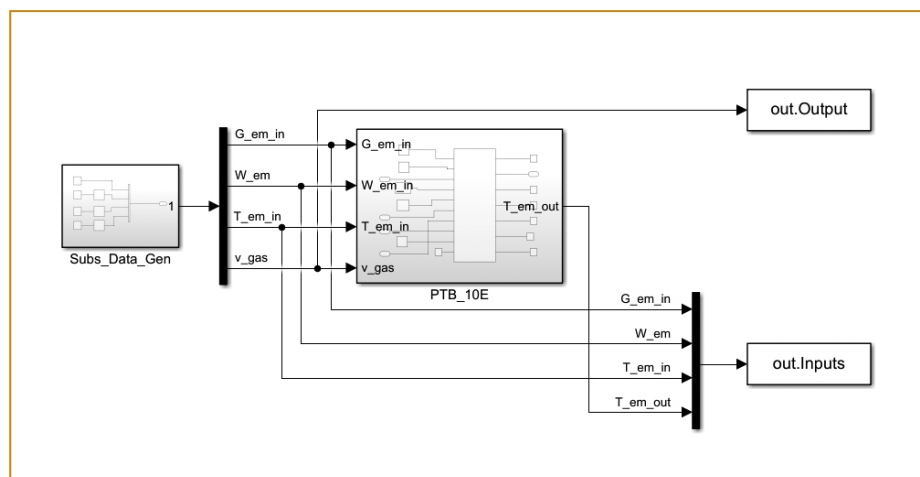


Рис. 12. Схема формирования обучающей выборки для тренировки нейронной сети

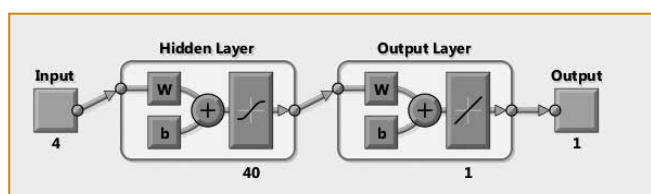


Рис. 13. Схема искусственной нейронной сети, заложенной в основу блока инверсного нейроэмулятора

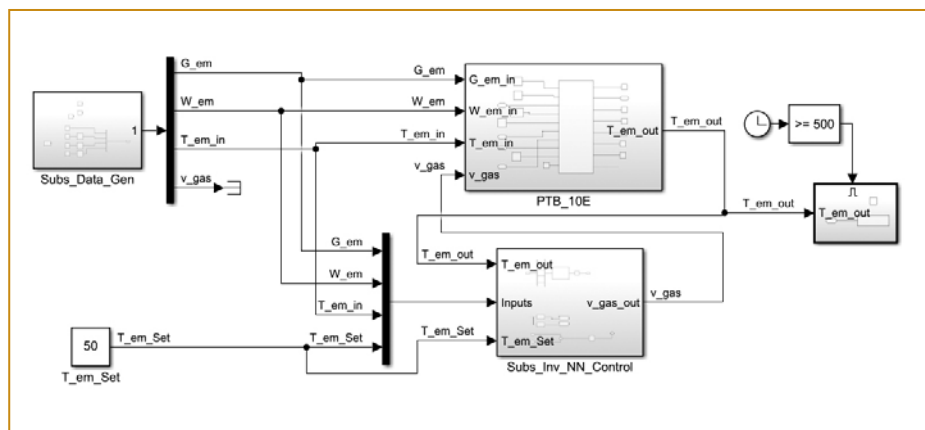


Рис. 14. Схема модели инверсного нейроуправления подогревателем ПТБ-10Э

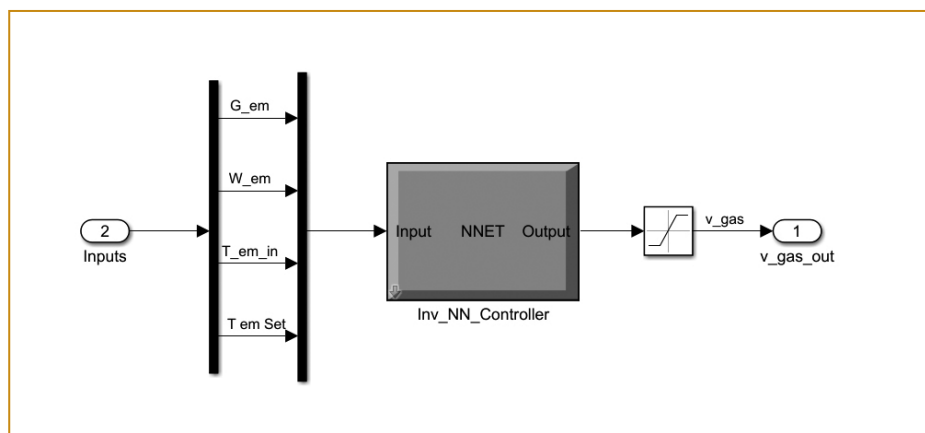


Рис. 15. Схема нейроконтроллера Subs\_Inv\_NN\_Control

она не способна реагировать на возмущения, которые не вошли в список входных переменных нейроконтроллера, но которые приводят к изменению температуры эмульсии на выходе подогревателя.

Кроме этого недостатком статического инверсного нейро-регулирования является избыточная реакция на действие возмущений обладающих существенным емкостным и/или транспортным запаздыванием, к каковым относятся, например, температура и влагосодержание эмульсии на входе в подогреватель. На правом нижнем графике рис. 16 максимальные пики температуры обусловлены именно данной причиной. Для компенсации указанной избыточной реакции в схему управления желательно вводить специальные динамические компенсаторы.

#### Схема динамической компенсации в системе инверсного нейруправления подогревателем

На рис. 17 показаны графики реакции сигнала температуры эмульсии на выходе подогревателя в ответ на импульсное воздействие со стороны входной температуры эмульсии и влагосодержания эмульсии на входе в подогреватель, полученные в ходе предварительных динамических исследований модели (в приведенных исследованиях учтена также инерционность датчиков измерения температуры входной/выходной эмульсии). Согласно данным графикам, каналы  $T_{em\ in} \rightarrow T_{em\ out}$  (левый график) и  $W_{em} \rightarrow T_{em\ out}$  (правый график) обладают транспортным запаздыванием около 60...70 с.

Мгновенная реакция со стороны прямого инверсного нейроконтроллера в виде регулирующего воздействия расходом топливного газа в момент времени нанесения



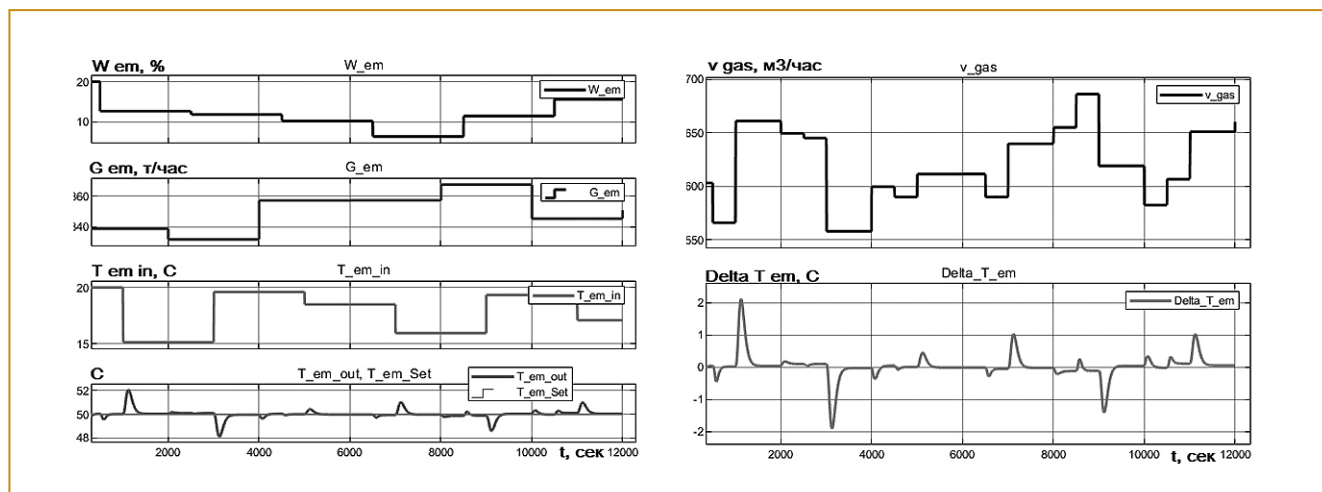


Рис. 16. Графики сигналов в режиме проверки качества регулирования процесса нейроконтроллером, где  $W_{em}$  – влагосодержание эмульсии,  $G_{em}$  – расход эмульсии,  $T_{em\_in}$  и  $T_{em\_out}$  – температура эмульсии на входе и выходе,  $T_{em\_Set}$  – уставка регулятора температуры эмульсии,  $v_{gas}$  – расход топливного газа в подогреватель,  $\Delta T_{em}$  – значение разницы между параметрами  $T_{em\_out}$  и  $T_{em\_Set}$

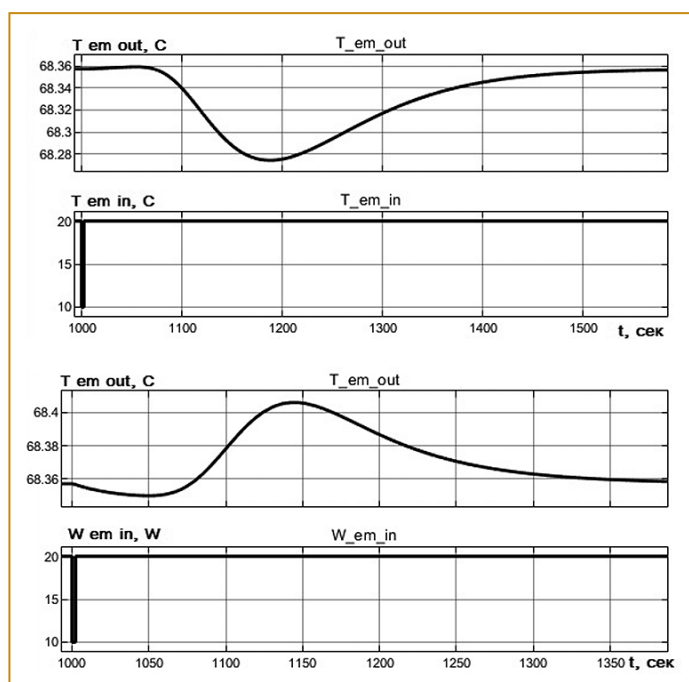


Рис. 17. Графики реакции сигнала температуры эмульсии на выходе подогревателя в ответ на импульсное воздействие со стороны входной температуры эмульсии  $T_{em\_in}$  (а) и влагосодержания эмульсии на входе в подогреватель  $W_{em\_in}$  (б)

импульсного воздействия неизбежно приводит к изменению выходной температуры, так как по каналу регулирования транспортное запаздывание значительно меньше (около 10 с), что и наблюдается на правом нижнем графике рис. 17. Для компенсации отрицательной избыточной реакции в схему прямого инверсного нейро-регулирования предлагается внести следующие изменения. Во-первых, установить на соответствующих входах нейроконтроллера блоки аperiодического запаздывания (фильтры первого по-

рядка), во-вторых, настроить постоянные времени фильтров таким образом, чтобы минимизировать динамический выбег выходной переменной, то есть экспериментально определить оптимальные значения постоянных времени фильтров. И, в-третьих, организовать схему корректировки оптимальных значений постоянных времени при изменении среднего времени пребывания эмульсии в трубопроводе, так как транспортное запаздывание указанных каналов определяется главным образом средним временем пребывания эмульсии.

На рис. 18 показана схема модели инверсного нейроконтроллера с добавленными блоками динамической компенсации избыточной реакции канала регулирования. Блоки фильтров F1 и F2 – это подсистемы, каждая из которых осуществляет решение линейного дифференциального уравнения 1-го порядка, с регулируемыми постоянными времени, подающимися на входы Т блоков. Блоки  $W_{em\_corr}$  и  $T_{em\_corr}$  выполняют расчет численных значений постоянных времени фильтров в зависимости от величины среднего времени пребывания эмульсии в трубопроводе (зависимости определены экспериментально). На рис. 19 показаны графики сигналов в режиме проверки качества регулирования процесса инверсным нейроконтроллером с блоками динамической компенсации.

За счет введения динамических компенсаторов воздействие регулируемого параметра на процесс стало более «мягким», что можно наблюдать из сравнения графиков расхода газа на рис. 16 и рис. 19. Максимальная амплитуда пиков выходной температуры эмульсии при этом уменьшилась с  $\pm 2$  °C до  $\pm 0,4$  °C при аналогичных входных возмущениях. Качество регулирования температуры эмульсии на выходе подогревателя, оцениваемое по величинам дисперсии  $\sigma^2$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , для инверсно-

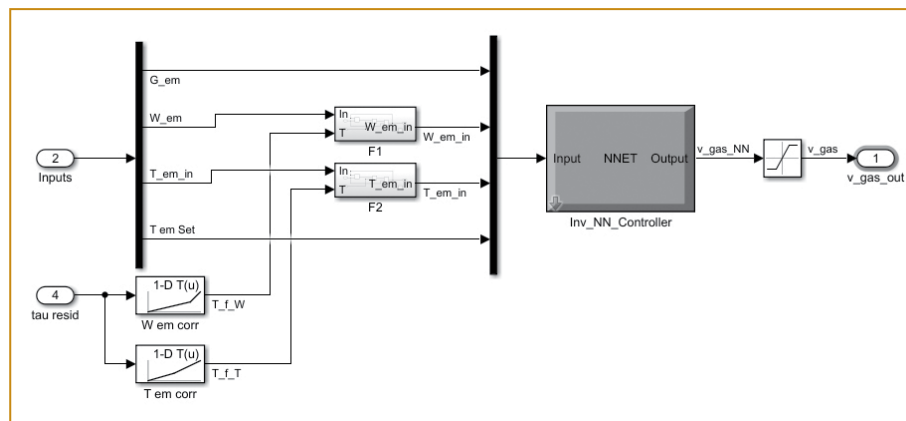


Рис. 18. Схема модели инверсного нейроконтроллера с добавленными блоками динамической компенсации избыточной реакции канала регулирования

го нейроконтроллера с блоками динамической компенсации составило:  $T_{em\_out} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm \Delta$ , где  $\Delta = 3\sigma = 0,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 0,013$ .

#### Схема комбинированного инверсного нейруправления и ПИД-регулирования

Для устранения другого недостатка разомкнутой схемы прямого инверсного нейруправления - невозможности компенсации неконтролируемых возмущений, сигналы о значениях которых не подаются на вход нейроконтроллера, в схему параллельно нейроконтроллеру вводится ПИД-регулятор, включенный по обычной схеме отрицательной обратной связи. Согласно схеме рис. 20, оба регулятора - нейронный и ПИД-действуют совместно и одновременно. Но у каждого своя задача. Инверсный нейроконтроллер компенсирует главные контролируемые возмущения, а ПИД-регулятор, играя роль «чистильщика», выбирает любые - динамические и статические - погрешности схемы инверсного регулирования, а также реагирует

по обычной схеме отрицательной обратной связи на прочие возмущения.

На рис. 21 изображены графики сигналов в режиме проверки качества управления схемой совместного нейро- и ПИД-регулирования. При этом в качестве неконтролируемого возмущения в схему введен сигнал об изменении относительной плотности топливного газа. Правый нижний график рис. 21 свидетельствует о том, что максимальные пики регулируемого параметра приходятся как раз на неконтро-

лируемые возмущения по относительной плотности топливного газа. Качество регулирования данной комбинированной схемы, оцениваемое по величинам дисперсии и СКО температуры эмульсии на выходе подогревателя от заданного значения ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), составляет:  $T_{em\_out} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm \Delta$ , где  $\Delta = 3\sigma = 0,39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma^2 = 0,0168$ .

#### Заключение

1. На основании анализа условий эксплуатации объектов подготовки нефти нефтегазовых месторождений и, в частности, подогревателей нефтяной эмульсии, сделан вывод о необходимости совершенствования традиционных систем управления УПН.
2. Указано на целесообразность применения аналитико-экспериментальных ячеечных моделей в качестве образцов для совершенствования традиционных средств регулирования и построения интеллектуальных систем управления объектами установок подготовки нефти.

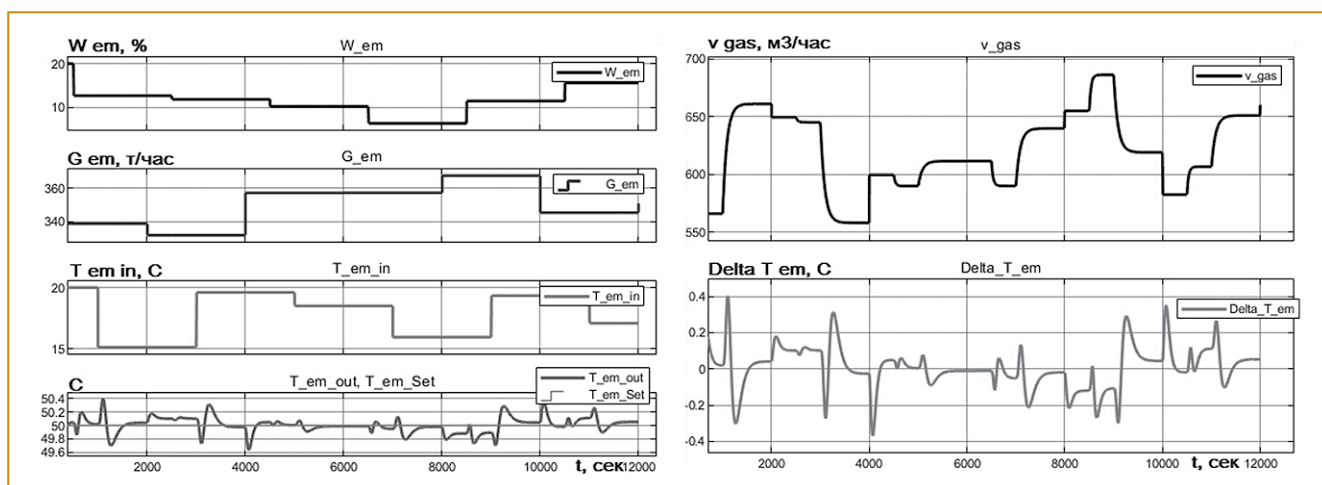


Рис. 19. Графики сигналов в режиме проверки качества регулирования процесса инверсным нейроконтроллером с блоками динамической компенсации, где  $G_{em}$  - расход эмульсии;  $W_{em}$  - влагосодержание эмульсии;  $T_{em\_in}$  - температура эмульсии на входе в подогреватель;  $V_{gas}$  - расход топливного газа, формируемый нейроконтроллером;  $T_{em\_out}$  - температура эмульсии на выходе подогревателя;  $T_{em\_Set}$  - уставка нейроконтроллера,  $\Delta T_{em}$  - значение разницы между параметрами  $T_{em\_out}$  и  $T_{em\_Set}$

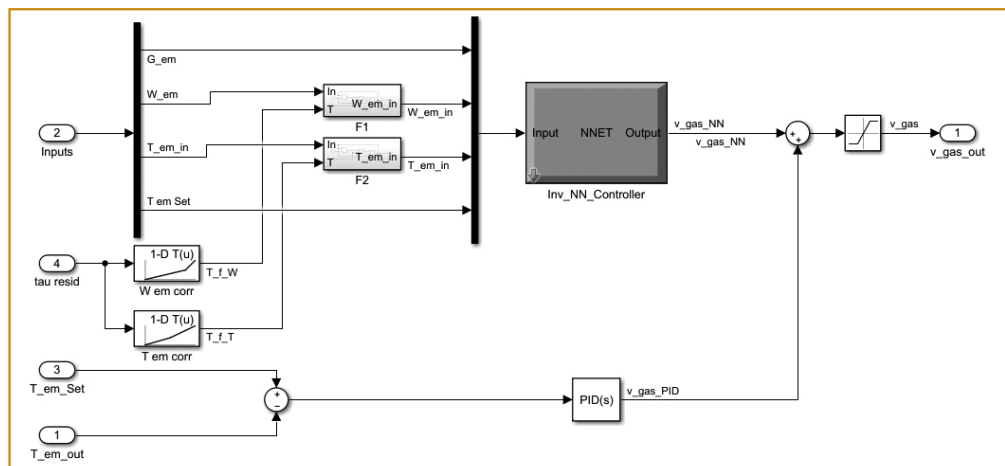


Рис. 20. Схема комбинированного инверсного нейруправления и ПИД-регулирования

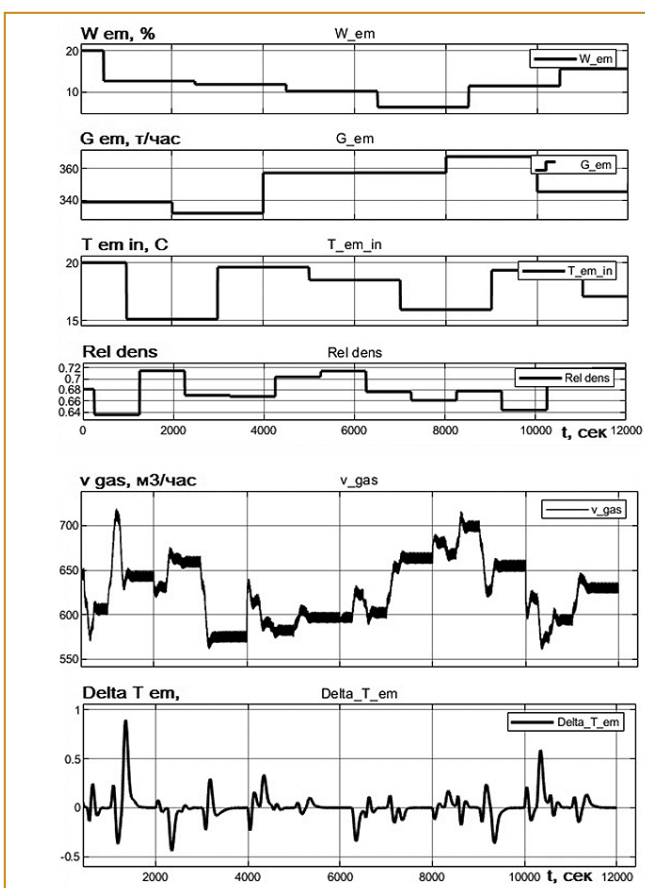


Рис. 21. Графики сигналов в режиме проверки качества регулирования процесса, полученные на комбинированной схеме инверсного нейроконтроллера и ПИД-регулятора, где  $G_{em}$  – расход эмульсии;  $W_{em}$  – влагосодержание эмульсии;  $T_{em\_in}$  – температура эмульсии на входе в подогреватель;  $v_{gas}$  – расход топливного газа;  $T_{em\_out}$  – температура эмульсии на выходе подогревателя;  $T_{em\_Set}$  – уставка нейроконтроллера,  $\Delta T_{em}$  – значение разницы между параметрами  $T_{em\_out}$  и  $T_{em\_Set}$ ,  $Rel\ dens$  – относительная плотность топливного газа

**Фарунцев Сергей Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника», ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет». E-mail: [sdfaruntsev@omgtu.ru](mailto:sdfaruntsev@omgtu.ru)

3. Приведены общее описание аналитико-экспериментальной модели подогревателя нефтяной эмульсии ПТБ-10Э и способ режимной настройки модели по данным эксплуатации. Рассмотренный способ позволяет доводить модель до уровня референсной, то есть обладающей необходимой гибкостью, способностью учитывать детали изменения технологического режима

и возмущающих воздействий и соответствующей не только статическим, но и динамическим характеристикам реального подогревателя.

4. Приведены варианты схем усовершенствованного и интеллектуального управления подогревателем, разработанные с использованием референсной модели объекта и основанные на применении технологий искусственных нейронных сетей.

#### Список литературы

1. Santos L. S. and et. Dynamic optimization of a continuous gas lift process using a mesh refining sequential method. DOI: 10.1016 / J.PETROL. 2018.02.019.
2. Foss, Bjarne. Process control in the upstream petroleum industries // Proceedings of the 2011 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, Thousand Islands Lake, Hangzhou, P.R. China. 2011.
3. Фарунцев С.Д., Гебель Е.С. Система усовершенствованного управления нефтегазоводоразделительным аппаратом установки подготовки нефти // Автоматизация в промышленности. 2019. №3. С. 45-51.
4. Тронов В. П. Промысловая подготовка нефти. Казань : ФЭН, 2000. 414 с.
5. Фарунцев С.Д. Метод создания ячеечных моделей как универсальное средство разработки математических моделей динамики для интеллектуального управления технологическими объектами нефтедобычи // IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update". ОмГТУ. 2020. С. 395-406.
6. Деменков Н.П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. №11. С. 66–69.
7. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. Prentice Hall. New York, 2008. 906 p.
8. Бураков М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры : Уч. пособие. СПб. : ГУАП, 2013. 284 с.

Поступила в редакцию 11.10.2020. Принята к публикации 1.03.2021