



СИСТЕМА УСОВЕРШЕНСТВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВОДОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

С. Д. Фарунцев (ООО «Инсист-Автоматика»),

Е.С. Гебель (Омский государственный технический университет)

На основании проведенного анализа основных возмущающих воздействий и регулируемых параметров установки подготовки нефти разработана усовершенствованная система управления нефтегазоводоразделительным аппаратом, использующая данные виртуальных анализаторов об общей теплотворной способности топливного газа и теплосодержании нефтяной эмульсии, а также соотношение тепловых потоков. Средствами имитационного моделирования пакета Matlab выполнен сравнительный анализ предложенной схемы регулирования температуры нефтяной эмульсии с традиционной системой управления, построенной на классических ПИД-регуляторах. В процессе исследования проигрывались наиболее распространенные сценарии, встречающиеся во время эксплуатации нефтегазоводоразделительного аппарата, а именно изменение загрузки и иные, типичные для объектов подготовки нефти возмущения.

Ключевые слова: нефтяная эмульсия, регулятор соотношения, каскадное управление, виртуальный анализатор.

Введение

Одним из действенных резервов повышения эффективности технологических процессов промышленной подготовки нефти является внедрение систем усовершенствованного управления (Advanced Process Control, APC), использующих в полном объеме возможности программно-технических средств математического моделирования и микропроцессорной техники. Если в нефтепереработке, нефтехимии и энергетике APC применяются широко и повсеместно [1–3], то опыт использования систем усовершенствованного управления на отечественных установках подготовки нефти (УПН) до настоящего времени носит весьма ограниченный характер [4, 5].

Под системами усовершенствованного управления технологическими процессами понимается широкий класс систем от расширенного регулирования (компенсаторы, системы управления соотношением, упредители Смита и др.) до систем многомерного управления крупными технологическими объектами [6, 7]. В состав последних входят наборы виртуальных анализаторов, что позволяет непосредственно управлять качеством товарных продуктов в автоматическом режиме. Указанная особенность является актуальной для объектов подготовки нефти, подверженных в процессе эксплуатации возмущающим воздействиям, непрерывный контроль и компенсация которых затруднены в виду отсутствия автоматических анализаторов. Разработка виртуальных анализаторов и внедрение их в контур управления способствует решению данной проблемы.

При этом построение гибридных систем управления, комбинирующих традиционные системы и методы регулирования — локальные, каскадные, соотношения параметров — в сочетании с современными

системами управления верхнего уровня, использующими средства математического моделирования и информационных технологий, представляется на данном этапе наиболее оптимальным вариантом модернизации промышленных систем автоматизации.

С целью повышения качества управления нефтегазоводоразделительным аппаратом (НГВРП) в настоящей работе предлагается использовать схему поддержания соотношения потоков с коррекцией по целевому параметру объекта регулирования — *температуре нефтяной эмульсии* на выходе НГВРП. Данный вариант системы регулирования соотношения расходов с коррекцией по третьему параметру давно известен [8]. Отличием настоящего способа является то, что предлагается регулировать не измеренные параметры материальных расходов, а расчетные показатели тепловой энергии, полученные от *виртуальных анализаторов*.

Ведущим в предлагаемой двухконтурной системе управления (*задающим соотношением*) является поток тепла, необходимого для нагрева эмульсии, ведомым (*отрабатываемым соотношением*) — поток тепла, связанный с расходом топливного газа. Поскольку указанные тепловые потоки вбирают в себя большинство действующих возмущений УПН, предполагается, что система стабилизации соотношения тепловых потоков позволит компенсировать действие возмущений и окажется весьма эффективным средством стабилизации качества процессов подготовки нефти.

Описание технологического процесса подогрева эмульсии в нефтегазоводоразделителе и систем автоматизации

Нефтяная эмульсия в виде смеси нефти, попутного нефтяного газа и пластовой воды поступает в нефте-

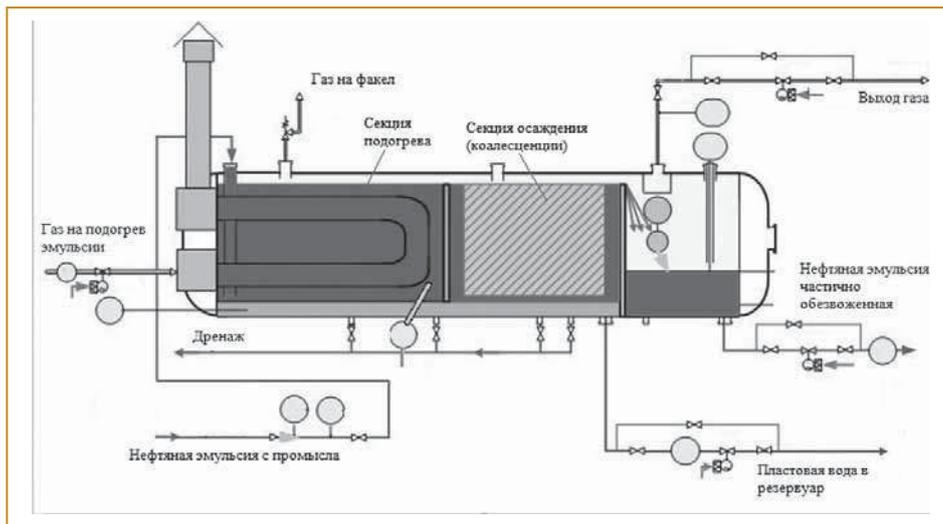


Рис. 1. Схема контроля процесса подогрева нефти в аппарате НГВРП

газоводоразделитель, являющийся одним из главных объектов установок подготовки нефти, либо напрямую из нефтяных скважин, но чаще — с объектов предварительного обезвоживания нефти. Аппарат НГВРП подогревает нефтяную эмульсию и осуществляет эффективное обезвоживание и сепарирование сырья (рис. 1). Существующие системы автоматизации НГВРП предназначены для обеспечения контроля и локального регулирования основных параметров: давления в газовой части аппарата с помощью клапана на трубопроводе газа из НГВРП, межфазового уровня изменением расхода воды из секции отстаивания воды, уровня в секции выгрузки регулированием расхода обезвоженной эмульсии и температуры в секции подогрева.

Целевым (выходным) показателем системы подогрева НГВРП является температура нефтяной эмульсии в аппарате (в секции подогрева), которая в типовой схеме измеряется и регулируется изменением расхода топливного газа. Общее количество нефтяной эмульсии, поступающей в аппарат, контролируется и изменяется в широких пределах. Этот параметр, как правило, не подлежит стабилизации в силу специфики процесса подготовки нефти в целом и является одним из главных возмущающих воздействий для системы регулирования подогревателя. Соотношение количества влаги и нефти в эмульсии оценивается показателем влагосодержания и также изменяется в широких пределах, сказываясь на показателях качества регулирования.

Для подогрева нефтяной эмульсии в НГВРП через систему горелок поступает газ (на практике — нефтяной попутный газ, выделившийся из нефти; в НГВРП также используется газ с выхода самого аппарата). Расход, температура и давление газа, используемого для горения, измеряются, расход — регулируется, но в силу неконтролируемого изменения состава газа, теплотворная способность продукта подвержена изменению.

Воздух, необходимый для горения топливного газа, поступает в зону горения естественным путем. Параметры воздуха — температура, влажность — влияют на процесс подогрева эмульсии, но, как правило, в схеме регулирования не участвуют и выступают дополнительными возмущающими воздействиями.

Перечисленные факторы (список не полный) приводят к снижению качества регулирования подогрева нефтяной эмульсии в традиционных системах автоматизации и, как следствие, процесса обезвоживания. В результате снижается эффективность процессов добычи и подготовки нефти в целом и становится актуальной задача применения современных методов управления аппаратом НГВРП.

Имитационная модель объекта управления (нефтегазоводоразделителя)

Для отработки различных вариантов систем регулирования в стендовых условиях разработана средствами Matlab/Simulink модель процесса подогрева нефтяной эмульсии в аппарате НГВРП.

Статика процесса подогрева нефтяной эмульсии описана балансовым уравнением, связывающим значение целевого параметра системы управления — температуры нефтяной эмульсии на выходе секции подогрева НГВРП в установившемся режиме t_{em_out} , с основными входными параметрами процесса: V_{gas_real} — объемным расходом топливного газа в секции подогрева, м³/ч; G_{em_real} — массовым расходом нефтяной эмульсии в секции подогрева, т/ч; t_{em_in} — температурой нефтяной эмульсии на входе в НГВРП, °С:

$$t_{em_out} = t_{em_in} + \frac{0,01 \cdot V_{gas_real} \cdot \eta \cdot REL_{caloric}}{G_{em_real} \cdot C_{em}}$$

Приведенное уравнение также включает показатели относительной теплотворной способности топливного газа $REL_{caloric}$, МДж/м³ и теплоемкости нефтяной эмульсии, C_{em} , МДж/т°С. Эффективность процесса подогрева в аппарате задает показатель коэффициента полезного действия η , отн. ед. (корректируемая внутренняя константа модели).

Механизм динамики тепловых процессов в подогревателе достаточно сложен. Но поскольку в настоящей работе не ставилась задача разработки системы управления, построенной на точной динамической модели объекта, авторы сочли возможным для сравнительного анализа и иллюстрации эффективности предлагаемой системы описать модель динамики те-

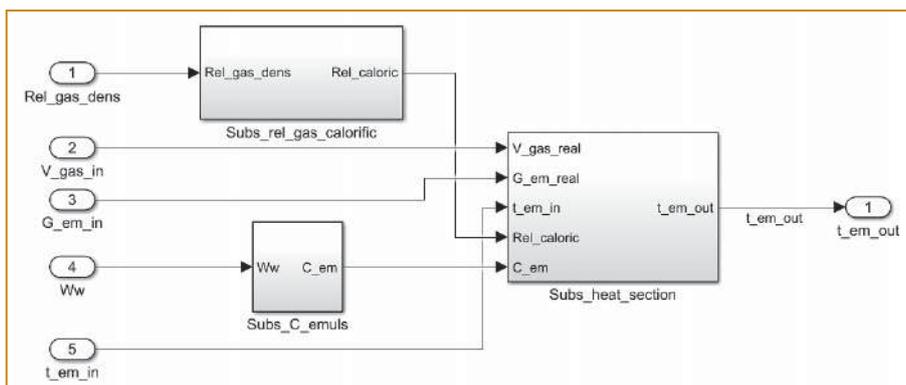


Рис. 2. Схема подсистемы *Subs_heat_section*

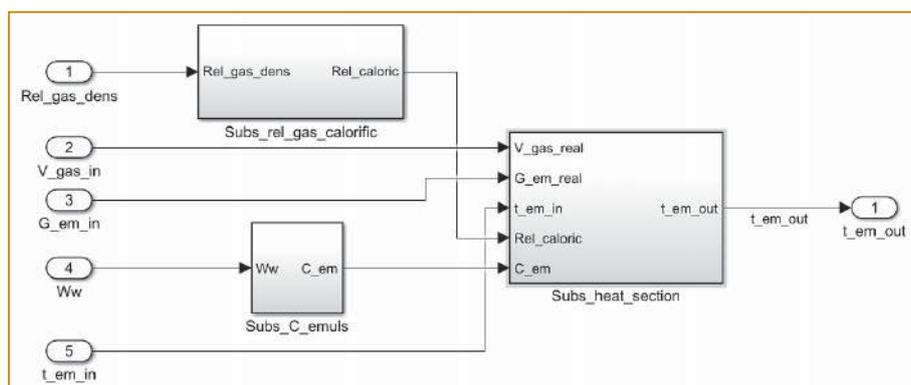


Рис. 3. Интеграционная модель секции подогрева нефтяной эмульсии в аппарате НГВРП

плового канала НГВРП упрощенным методом — последовательностью апериодических звеньев первого порядка в виде блоков *State-Space*, константы времени которых заданы на основании опубликованных данных [9] и экспертных оценок.

Модель подсистемы подогрева нефтяной эмульсии, реализующая как статику, так и динамику процесса, изображена на рис. 2.

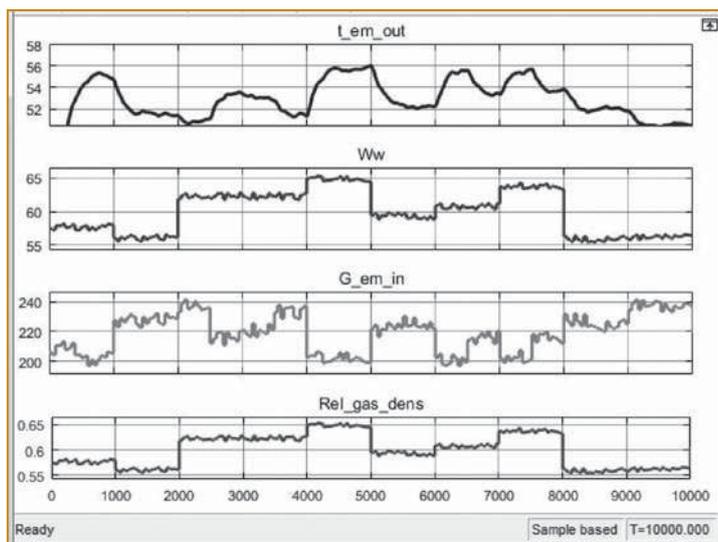


Рис. 4. Результат испытания модели объекта управления в условиях действия возмущений

Показатели относительной теплотворной способности топливного газа $Rel_caloric$ и теплоемкости нефтяной эмульсии C_em , поступающие на вход модели, рассчитываются в подсистемах *Subs_rel_gas_calorific* и *Subs_C_emuls* соответственно. Интеграционная модель секции подогрева, включающая все три подсистемы, изображена на рис. 3.

Относительная теплотворная способность топливного газа рассчитывается подсистемой *Subs_rel_gas_calorific* на основании данных его относительной плотности по воздуху Rel_gas_dens , отн. ед., а теплоемкость нефтяной эмульсии вычисляется подсистемой *Subs_C_emuls* в зависимости от показателя влагосодержания нефтяной эмульсии $Ww, \%$.

Испытание традиционной системы регулирования температуры эмульсии

С целью анализа основных возмущающих воздействий и регулируемых параметров на первом этапе исследования разработана имитационная модель установки подготовки нефти. Результат испытания модели объекта управления в условиях действия интенсивного фона возмущений (без регулятора) иллюстрируется рис. 4. На вход модели поступали возмущения разной периодичности одновременно по трем каналам — относительной плотности топливного газа Rel_gas_dens , влагосодержания нефтяной эмульсии Ww и расхода нефтяной эмульсии G_em_real . Расход топливного газа поддерживался на постоянном уровне $700 \text{ м}^3/\text{ч}$. При этом наблюдались колебания температуры эмульсии t_em_out на выходе НГВРП в диапазоне $50... 55^\circ\text{C}$, хотя процесс в силу естественного самовывравнивания удерживался около среднего значения. По оси абсцисс на приведенном и всех последующих графиках отложено время в секундах.

Для реализации одноконтурной системы регулирования в цепь отрицательной обратной связи модели объекта управления был подключен блок стандартного ПИД-регулятора с уставкой поддержания температуры эмульсии на выходе подогревателя 50°C , выход которого задавал расход топливного газа на вход объекта управления. Результат моделирования иллюстрируется на рис. 5.

При наличии общего фона возмущений, аналогичного предыдущему этапу, разброс значений температуры на выходе НГВРП в ре-

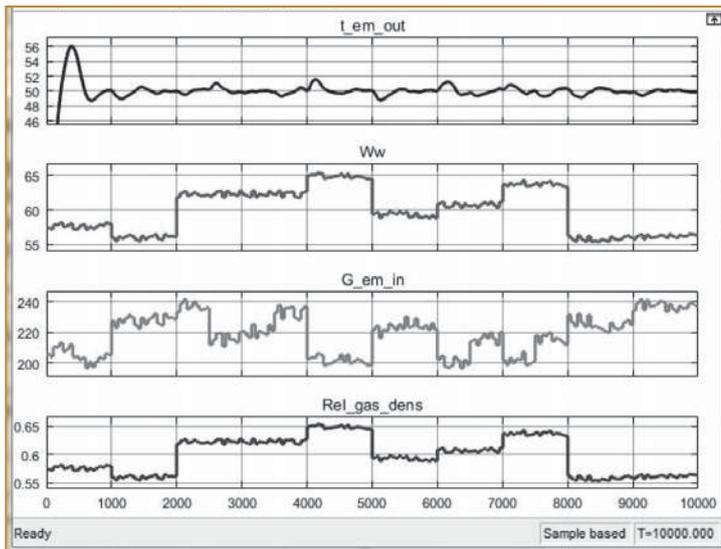


Рис. 5. Результат испытания модели одноконтурной системы регулирования

зультате регулирования значительно сократился и находился в пределах 49...51°C, хотя наблюдались длительные переходные процессы, обусловленные динамическими свойствами объекта. В целом динамика регулирования, полученная с использованием локального регулятора, не может считаться удовлетворительной.

Двухконтурная система регулирования температуры нефтяной эмульсии

Функциональная схема усовершенствованной системы регулирования температуры нефтяной эмульсии в аппарате НГВРП показана на рис. 6.

Первый контур регулирования составлен системой непрерывного мониторинга показателей теплотворной способности газа и теплосодержания эмульсии с помощью виртуальных анализаторов и автоматического поддержания с помощью локального регулятора соотношения потоков тепла, полученного нефтяной эмульсией в процессе подогрева, и количество тепла, переданного от топливного газа нефтяной эмульсии при сгорании газа. Данный регулятор является ПИ-регулятором, на вход которого поступает расчетное значение соотношения тепловых потоков, а выход подключен к клапану расхода газа.

При этом происходит компенсация основных возмущений в системе регулирования температуры эмульсии — изменения состава и плотности топливного газа, колебаний расхода и влагосодержания эмульсии, температуры эмульсии и окружающей среды.

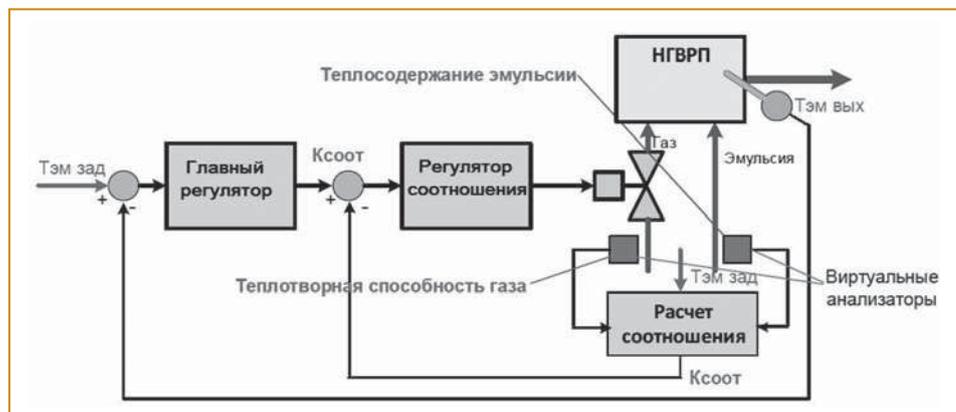


Рис. 6. Структурная схема усовершенствованной системы регулирования температуры эмульсии

Неизбежные отклонения выходной температуры эмульсии от задания, вызываемые погрешностями в работе анализатора соотношения и влиянием не учитываемых возмущений, обрабатываются главным регулятором, включенным в контур отрицательной обратной связи и воздействующим на задание локального регулятора по принципу каскадной системы регулирования.

В случае поддержания постоянства соотношения тепловых потоков $K_{соот}$ основные контролируемые возмущения по расходу и влагосодержанию эмульсии, плотности газа не должны влиять на температуру эмульсии на выходе НГВРП. Если в силу погрешности виртуальных анализаторов или неконтролируемого изменения тепловых характеристик НГВРП выходная переменная $T_{эм\ вых}$ отклонится от заданного значения $T_{эм\ зад}$, то главный регулятор автоматически устранил рассогласование, изменив задание $K_{соот}$.

Количество тепла $E_{эм}$, полученного нефтяной эмульсией в процессе подогрева, рассчитывается с использованием показаний виртуального анализатора теплосодержания эмульсии по уравнению:

$$E_{эм} = G_{эм} \cdot (T_{вых} - T_{вх}) \cdot C_{эм},$$

где $G_{эм}$ — массовый расход эмульсии, т/ч; $C_{эм}$ — удельная теплоемкость (теплосодержание) нефтяной эмульсии, КДж/кг°C; $T_{вых}$ и $T_{вх}$ — выходная и входная температуры эмульсии соответственно, °С. Величина удельной теплоемкости нефтяной эмульсии является функцией ее влагосодержания и также вычисляется.

Количество тепла E_g , переданного от топливного газа нефтяной эмульсии в процессе его сгорания, рассчитывается с использованием показаний виртуального анализатора теплотворной способности газа:

$$E_g = 0,01 \cdot \eta \cdot Q_g \cdot V_g,$$

где η — КПД подогревателя, %; Q_g — теплотворная способность топливного газа, МДж/м³; V_g — объем-

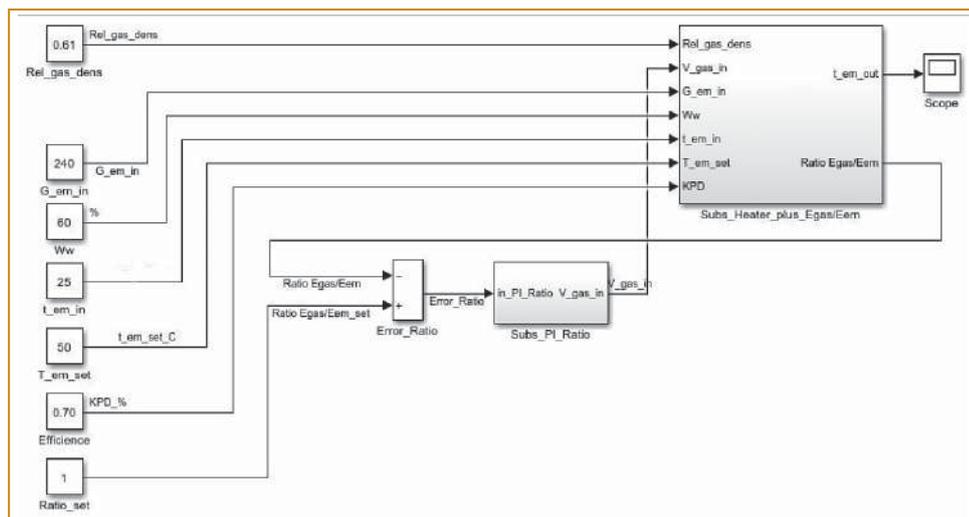


Рис. 7. Схема первого контура системы управления секцией нагрева *Heater_plus_Control*

ный расход топливного газа, м³/ч. Теплотворная способность рассчитывается виртуальным анализатором в зависимости от относительной плотности газа по уравнению Воббе¹.

Модельная схема испытания первого контура системы регулирования показана на рис. 7. Блок вычисления соотношения тепловых потоков объединен с подсистемой объекта управления, в совокупности они составляют подсистему *Subs_Heater_plus_Egas/Eem*, имеющую два выхода: температура эмульсии t_{em_out} и текущее значение соотношения тепловых потоков $Ratio_Egas/Eem$.

Входным сигналом ПИ-регулятора соотношения является рассогласование между заданным значением отношения тепловых потоков $Ratio_Egas/Eem_set$ и текущим его значением $Ratio_Egas/Eem$. Сигнал с выхода ПИ-регулятора (объемный расход топливного газа в секции подогрева V_{gas_in}) поступает на вход

т.е. ступенчатые изменения разной периодичности относительной плотности топливного газа Rel_gas_dens , влагосодержания нефтяной эмульсии Ww и расхода нефтяной эмульсии G_em_real (задатчики на схеме рис. 7 заменялись на генераторы случайных сигналов). Результаты испытаний показаны на рис. 8.

Разброс значений выходной переменной около среднего значения, по сравнению с традиционной системой регулирования, оказался значительно меньше (в пределах полградуса относительно среднего 50,5°C), сократилось время переходных процессов. Однако имело место отклонение температуры эмульсии на выходе от желаемого значения 50°C, что для подобной одноконтурной системы поддержания соотношения является закономерным событием, т.к. регулятор нижнего уровня настроен на поддержание соотношения, а не температуры. И любые погрешности в схемах измерения или расчета тепловых потоков, будут неизбежно вызывать подобные ошибки.

Для повышения точности регулирования необходимо добавить в систему главный регулятор, включенный в контур отрицательной обратной связи по выходной переменной процесса — температуре эмульсии (см. рис. 9).

На вход главного регулятора поступает сигнал отклонения выходной переменной от заданного значения, выход главного регулятора является заданием для регулятора нижнего уровня.

Чтобы исключить возможность взаимной раскачки регуляторов предлагаемой каскадной схемы управления, необходимо в процессе моделирования исключить ситуацию одновременного пуска регуляторов. Для реализации указанного требования средствами *Matlab/Simulink* было применено разное время дискретизации

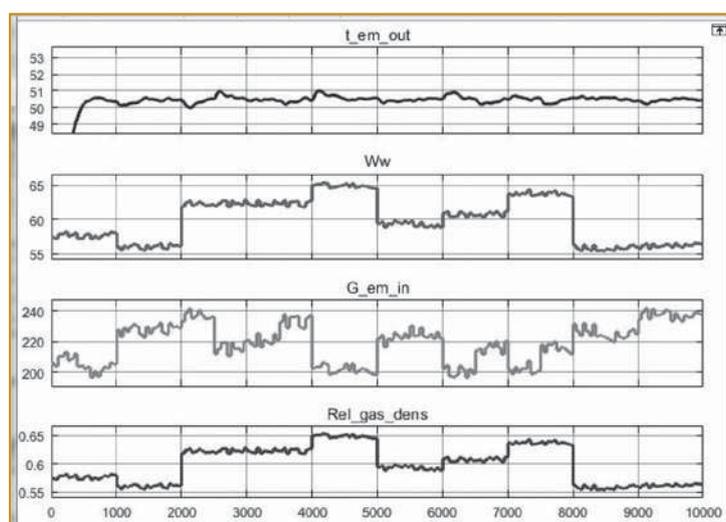


Рис. 8. Результаты испытания одноконтурной схемы управления соотношением тепловых потоков

¹ ГОСТ 31369-2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава (2008) // Межгосударственный совет стандартизации, метрологии и сертификации. Москва: Стандартинформ.

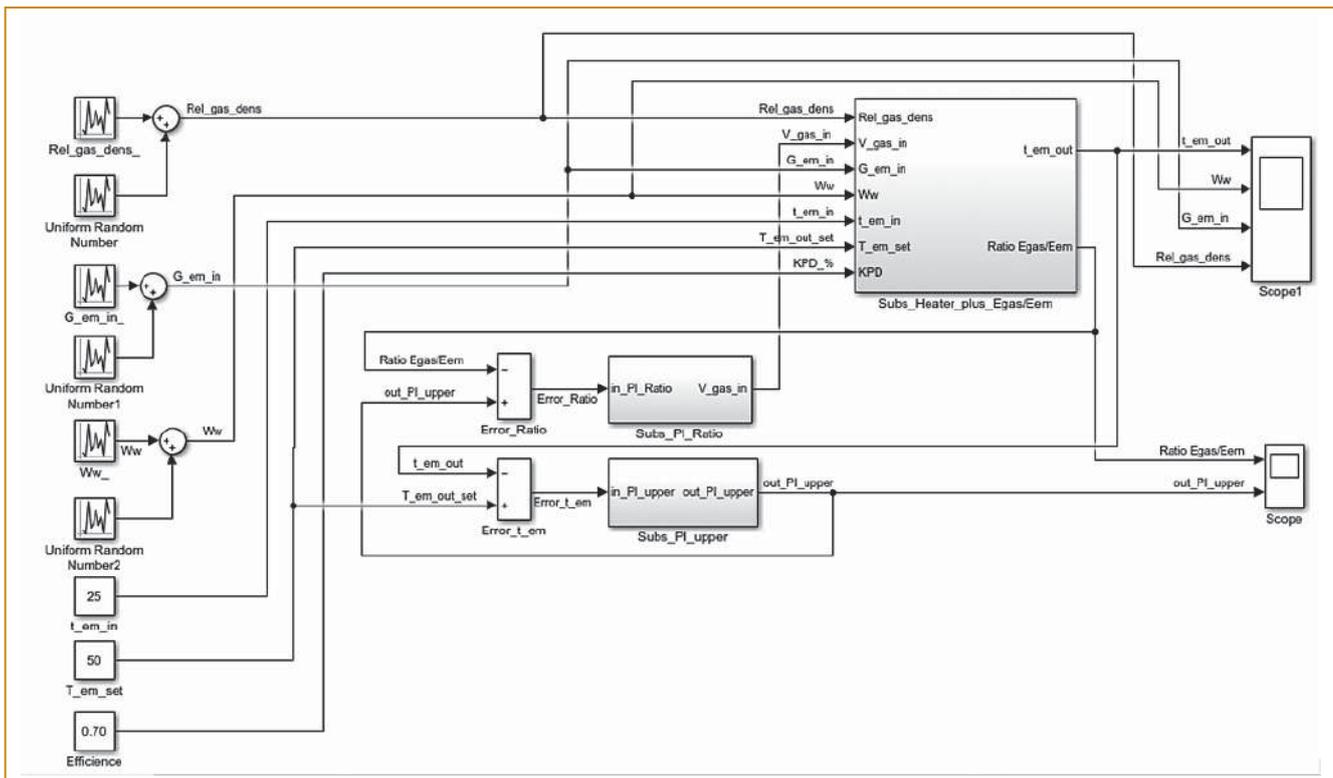


Рис. 9. Схема моделирования каскадной двухконтурной системы регулирования температуры нефтяной эмульсии на выходе нефтегазоводоразделителя

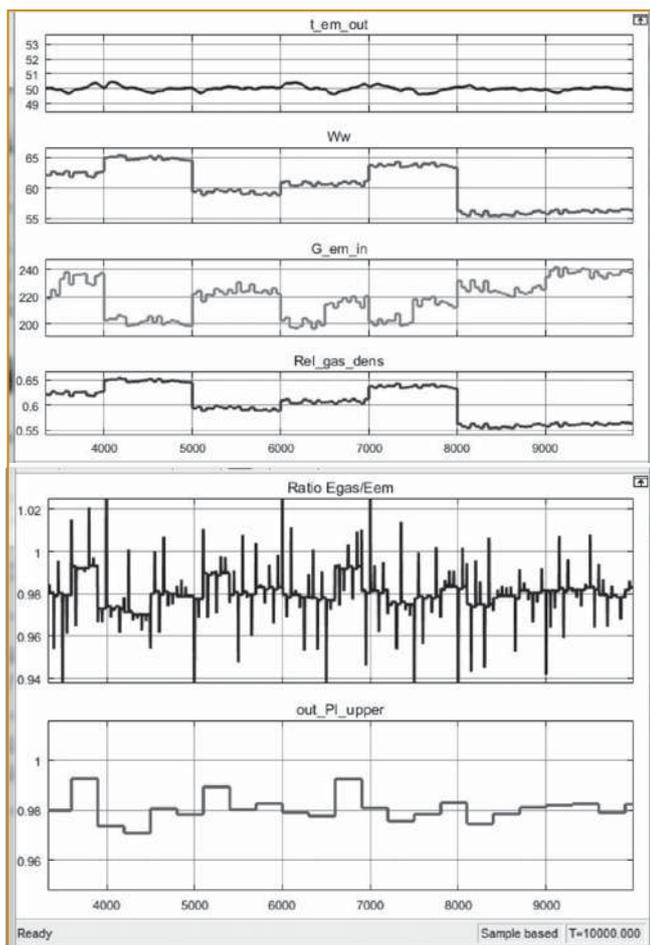


Рис. 10. Результаты испытания каскадной двухконтурной системы регулирования температуры нефтяной эмульсии

регуляторов (на рис. 9 контуры с разным периодом обозначены разным цветом).

Результаты испытания каскадной двухуровневой системы регулирования температуры нефтяной эмульсии на выходе подогревателя проиллюстрированы рис. 10. Показаны графики изменения основных возмущающих воздействий, выходной переменной $t_{em\ out}$, а также изменения соотношения тепловых потоков $Ratio\ Egas/Eem$ в процессе регулирования и выхода главного регулятора out_PI_upper .

За счет введения главного регулятора в контур обратной связи исчезло рассогласование сигналов, имевшее место в предыдущей серии испытаний. Температура эмульсии на выходе подогревателя поддерживается в диапазоне плюс/минус $0,5^\circ\text{C}$ относительно заданного значения 50°C . Необходимо отметить, что главный регулятор, корректируя задание регулятору соотношения, в состоянии также подавлять любые низкочастотные возмущения, воздействующие на температуру подогрева, например, имеющие суточный или сезонный характер.

Заключение

Предлагаемая усовершенствованная система регулирования температуры нефтяной эмульсии на выходе нефтегазоводоразделителя построена по схеме двухконтурного каскадного регулирования и состоит из следующих элементов.

1. Блока расчета качественных показателей входных потоков (виртуальных анализаторов):
 - теплотворной способности потока топливного газа;
 - теплосодержания нефтяной эмульсии.

Промышленный прогресс совсем не параллелен в истории прогрессу искусства и истинной цивилизации.

Эрнест Ренан

2. Регулятора соотношения общей теплотворной способности потока топливного газа и количества тепла, необходимого для нагрева эмульсии до заданной температуры для формирования управляющего воздействия на регулирующий клапан, установленный на трубопроводе топливного газа.

3. Главного регулятора, формирующего задание для регулятора соотношения в зависимости от температуры нефтяной эмульсии на выходе подогревателя.

Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность предложенных решений, позволяющих повысить точность стабилизации выходной температуры эмульсии в условиях действия возмущений.

Список литературы

1. Торгашов А.Ю., Гончаров А.А., Самтылова С.А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическим процессом // Вестник ДВО РАН. 2016. № 4. С. 102 - 107.

Фарунцев Сергей Дмитриевич — консультант отдела Дирекции по развитию ООО «Инсист Автоматика», Гебель Елена Сергеевна — канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация и робототехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Контактный телефон (3812) 65-21-76.

E-mail: faruntsev@industrialsystems.ru gebel_es@mail.ru

Поступило в редакцию 29.01.2019.

Принято к публикации 18.02.2019.

ГКС (АО «Группа Систематика») и МГППУ (Московский государственный психолого-педагогический университет) объявляют об окончании основного этапа разработки коммуникационного устройства «Тактильная рука» для людей с нарушениями слуха и зрения

Согласно опубликованным данным, в России порядка 218 тыс. граждан имеют инвалидность по нарушению зрения, а 103 тыс. человек из них абсолютно слепые. Развитие технологий позволяет сделать жизнь людей с ограниченными возможностями более комфортной, безопасной и активной. Разработанное МГППУ совместно с ГКС устройство «Тактильная рука» позволяет слабовидящим и слепым людям постоянно находиться на связи и общаться с внешним миром.

«Тактильная рука» преобразовывает с помощью специально разработанного мобильного приложения текстовую информацию из смартфона в осязаемые пользователем на руке механические воздействия. Передаваемый текст может поступать в смартфон как через СМС-сообщение или электронную почту, а также вводиться с помощью голосового набора.

Информация передается путем включения на короткое время в определенной последовательности шести вибромоторов, размещенных в манжете, надеваемой на предплечье выше кисти руки. Кодирование сигнала осуществляется на основе шеститочечного представления символов Брайля (шрифт Брайля — рельефно-точечный тактильный шрифт, предназначенный для письма и чтения незрячими и плохо видящими людьми. Разработан в 1824 г. французом Луи Брайлем).

С помощью устройства «Тактильная рука» люди, лишенные зрения, смогут оперативно получать СМС-сообщения и электронную почту от родных и близких, общаться в чатах, пользоваться

2. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (АРС): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12 - 19.

3. Файрузов Д.Х. и др. Система усовершенствованного управления установкой первичной переработки нефти: создание, внедрение, сопровождение // Автоматизация в промышленности. 2013. № 8. С. 3 - 10.

4. Веревкин А.П. Методы решения «продвинутых» задач управления и обеспечения безопасности для объектов нефтегазового комплекса // Тр. Всероссийской научно-технической конф. Уфа, 2010. С. 8 - 23.

5. Зозуля В. Ю., Зозуля Ю.И. Имитационное моделирование объектов нефтегазодобычи в подсистемах мониторинга // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 4. С. 32 - 36.

6. Comacho E. F., Bordos C. Model Predictive Control. Springer. 1999.

7. Tatjevsky P. Advanced Control of Industry Process: Structures and Algorithms: Springer. 2010.

8. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности : уч. для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1985. 352 С.

9. Ельцов И.Д. Управление технологическим процессом подготовки нефти по технико-экономическим показателям. Диссертация на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Уфа, 2007.

мобильными приложениями для навигации в городе — жить более активной и полной жизнью. Передача информации тактильным способом позволяет слепым людям беречь слух, который у них страдает от перегрузки, и даёт возможность получать сообщения в шумных помещениях или на улице.

Работы над устройством были начаты в 2014 г. В июне 2015 г. был готов первый прототип устройства и начались работы над техническим дизайном. Параллельно была подана заявка в РОСПАТЕНТ, и в 2016 г. было получено положительное решение на регистрацию полезной модели. В середине 2016 г. начались лабораторные испытания нескольких опытных образцов устройства и первой версии ПО. Затем устройство «Тактильная рука» было протестировано с участием фокус-группы на базе проекта «Полигон», созданного фондом «Соединение». В начале 2018 г. была выпущена первая партия устройств с учетом всех замечаний, полученных в процессе первого этапа тестирования.

В настоящее время выпущена партия устройств «Тактильная рука» для проведения совместно с рядом благотворительных фондов испытаний устройства в фокус-группах. Задачей следующего этапа будет доработка устройства и мобильного приложения по результатам испытаний, а также дополнение устройства функциями ввода информации, чтобы пользователи могли отвечать на получаемые сообщения, отправлять СМС, набирать «тревожный» номер телефона в случае непредвиденных обстоятельств. Запланированы также работы по созданию версии мобильного приложения для iOS.

[Http://www.gcs.ru](http://www.gcs.ru)