

УДК 681.5.017

СИСТЕМА ПАРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Матвейкин Валерий Григорьевич¹,
ipu_tstu@mail.ru

Краснянский Михаил Николаевич¹,
tstu@tstu.ru

Дмитриевский Борис Сергеевич¹,
dmiboris@yandex.ru

Василевский Константин Сергеевич¹,
kvasilevskii@yandex.ru

¹ Тамбовский Государственный технический университет,
Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5, пом. 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки и внедрения комплекса программно-технических средств – системы автоматизированного управления процессом пароснабжения – для осуществления оптимального управления энергетическими ресурсами – паром среднего и высокого давления. В настоящий момент система управления данным ресурсом представляет собой разрозненные локальные системы автоматизированного регулирования с обратной связью, осуществляющие стабилизацию параметров теплоносителя в момент подачи на установку. Исследование в данном направлении позволит сформировать централизованный подход к управлению технологическим процессом пароснабжения и улучшить технико-экономические показатели нефтеперерабатывающих производств.

Цель: разработка такой автоматизированной системы управления процессом пароснабжения, которая бы сократила потребление пара внешней выработки и максимально использовала внутренние ресурсы предприятия. В рамках реализации данной системы предполагается, что разрабатываемая автоматизированная система управления направлена на повышение энергоэффективности паропотребляющих производств.

Объект: система пароснабжения нефтеперерабатывающего предприятия, состоящая из последовательно и параллельно соединенных трубопроводами установок-потребителей и установок-генераторов пара среднего и высокого давления.

Методы исследования основаны на формировании математического описания установок, участвующих в технологическом процессе пароснабжения, вычислительной математики, теоретических основ автоматического управления, а также современных подходов в управлении технологическим процессом.

Результаты. Осуществлена декомпозиция технологического процесса пароснабжения в разрезе отдельных установок. Каждый элемент был рассмотрен как объект управления, для каждого из объектов управления определены векторы входных, выходных, промежуточных величин и возмущающего воздействия. На основе полученных данных предложен алгоритм управления процессом пароснабжения, определена структура системы управления и подобраны основные элементы комплекса программно-технических средств.

Ключевые слова:

Система пароснабжения, система управления, пароконденсатный баланс, объект управления, пар высокого давления, пар среднего давления.

Введение

В рамках рыночной экономики на данный момент особо актуальным направлением становится повышение энергоэффективности технологических производств [1] путем разработки и внедрения систем автоматизированного управления технологическими процессами [2, 3]. Построение системы, отвечающей строгим современным требованиям, невозможно без точной и адекватной модели технологического процесса, входящей в состав математического обеспечения системы управления [4, 5].

На нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях водяной пар используется в качестве основного теплоносителя. На производстве активно применяется пар высокого (ПВД) и среднего (ПСД) давления. Пар на технологических установках используется для нагрева нефтепродуктов, паротушения, распыла топлива и т. д.

Наиболее распространенные элементы нефтепереработки, участвующие в рассматриваемом технологическом процессе: установки каталитического крекинга (УКК), блоки каталитического реформирования серосодержащих газов (БКРСГ), установки стабилизации конденсата (УСК), установки каталитического реформинга (УКР), установки приготовления эмульсии и суспензии (УПЭС), установки первичной перегонки (АВТ) и другие [6].

На данный момент основная часть пара высокого и среднего давления генерируется внутри предприятия и распределяется между установками-потребителями. Теплота, вырабатываемая установками посредством котлов-утилизаторов преобразуется в водяной пар. При недостатке пара низкого давления происходит его подпитка из системы пара высокого давления с последующим редуцированием при помощи редуционно-охладительных установок (РОУ).

Недостающая часть пара поступает на производство с ТЭЦ по паропроводу. При поступлении на производство производится подпитка систем пара высокого и среднего давления.

Также на предприятии присутствует конденсатная система – конденсат с установок собирается посредством трубопроводов, производится очистка, и очищенный конденсат поступает в тепловые сети предприятия. Для распределения пара и конденсата между установками применяется протяженная система межцеховых трубопроводов различного диаметра.

Анализ технологического процесса и существующих систем контроля и управления

Установки, входящие в состав типового нефтеперерабатывающего технологического процесса, делятся на несколько групп по критерию потребления/генерации пара и конденсата:

- установки, производящие пар высокого давления;
- установки, потребляющие пар высокого и производящие пар среднего давления;
- установки, потребляющие пар высокого давления, производящие пар среднего давления и конденсат;
- установки, потребляющие пар высокого давления и производящие конденсат;
- установки, потребляющие пар среднего давления и производящие конденсат.

Балансовая пароконденсатная схема предприятия представлена на рис. 1.

Источники пара поддерживают заданное давление в системе пара высокого давления, излишки сбрасываются через редукционно-охладительную установку в систему среднего давления. На входе в каждую установку предусмотрен локальный редукционный узел, позволяющий скорректировать параметры пара, подаваемого на установку, в соответствии с технологическим регламентом.

В зависимости от температуры атмосферного воздуха присутствуют дополнительные потери температуры и давления пара на внешнем и внутреннем паропроводе, а также непосредственно в самих установках. Так как локальные редукционные узлы на входе каждой установки имеют идентичную структуру и комплекс программно-технических средств, для части установок производится управление температурой, а для части – давлением подаваемого на установку пара в соответствии с внешним температурным графиком.

На данный момент комплексная система управления процессом пароснабжения практически не реализована. В эксплуатацию введены только локальные автоматизированные системы, предназначенные для стабилизации давления и температуры пара на входе в каждую установку [7].

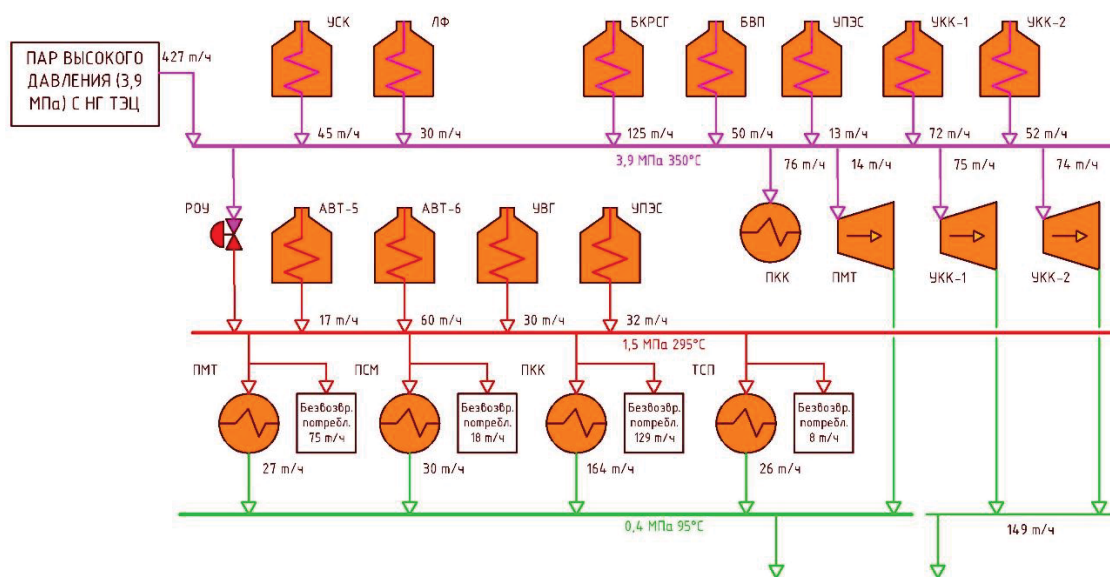


Рис. 1. Балансовая пароконденсатная схема предприятия
Fig. 1. Steam and condensate balance scheme of the plant

Данное решение имеет большое количество недостатков:

- 1) локальные системы автоматизированного управления на установках-потребителях, осуществляющие стабилизацию давления пара на входе, не позволяют достичь необходимого качества регулирования: при определенных режимах функционирования системы невозможно обеспечить некоторые установки паром с требуемыми параметрами;

- 2) в непрерывном процессе возникает необходимость перераспределения мощностей установок-генераторов и установок-потребителей в реальном времени для обеспечения непрерывности работы производства;
- 3) в непрерывном процессе возникает необходимость в адаптации локальных автоматизированных узлов к погодным, сезонным условиям;
- 4) в случае аварийных и нештатных ситуаций отсутствует возможность дистанционного обнаружения

- аварии и автоматического вывода установки/участка из эксплуатации по аварийному алгоритму;
- 5) существующая система пара высокого давления более чем на 30 % зависит от внешнего энергетического ресурса, причем существующие мощности установок-производителей пара способны на 100 % обеспечить потребность предприятия в остром паре при условии оптимального парораспределения.
- Оптимизация системы пароснабжения требуется при решении следующих задач:

- а) снабжение без перебоев потребителей паром заданных параметров;
- б) максимальное и эффективное использование внутренних энергоресурсов, установление оптимального назначения их использования;
- в) выполнение баланса прихода и расхода энергоресурсов на любом отрезке времени при учете реальных графиков эксплуатации агрегатов с минимумом потерь энергоресурсов.
- Упрощенная структурная схема пароснабжения представлена на рис. 2.

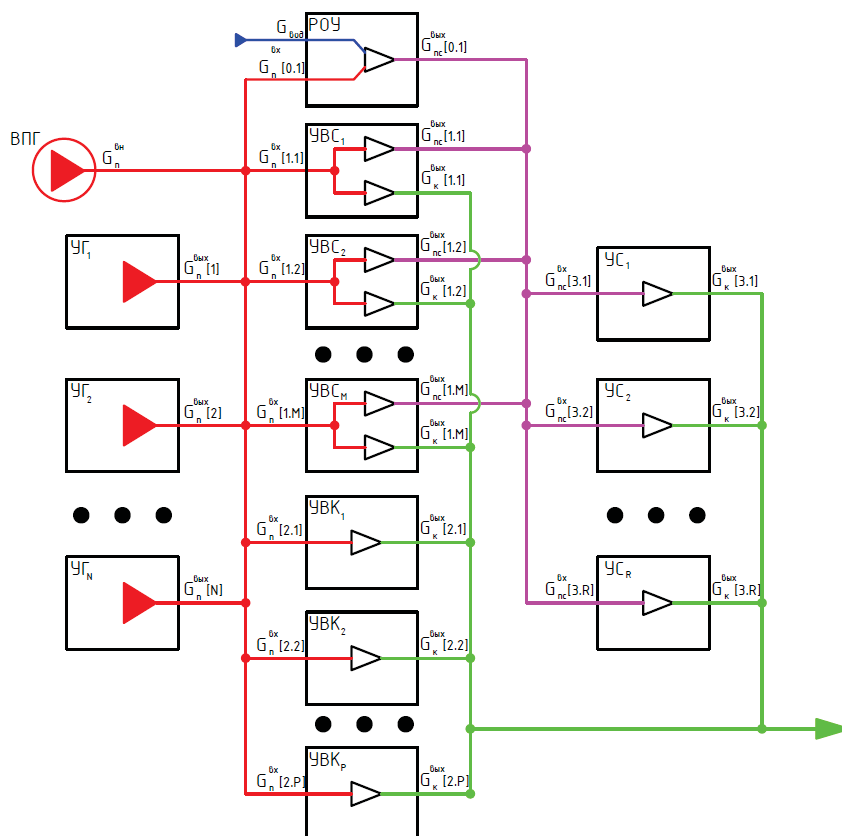


Рис. 2. Структурная схема парораспределения: ВПГ – внешний паровой генератор; УГ₁..УГ_N – установки, производящие пар высокого давления; УВС₁..УВС_M – установки, потребляющие пар высокого давления, производящие пар среднего давления и конденсат; УВК₁..УВК_P – установки, потребляющие пар высокого давления и производящие конденсат; УС₁..УС_R – установки, потребляющие пар среднего давления и производящие конденсат; РОУ – редукционно-охладительная установка

Fig. 2. Block diagram of steam distribution: ВПГ – external steam generator; УГ₁..УГ_N – plant-producers of high-pressure steam; УВС₁..УВС_M – plants that consume high-pressure steam, produce medium-pressure steam and condensate; УВК₁..УВК_P – plants that consume high-pressure steam, produce condensate; УС₁..УС_R – plants that consume medium-pressure steam, produce condensate; РОУ – reduction and cooling unit

Анализ установок как объектов управления

Для анализа процесса пароснабжения как объекта управления необходимо определить векторы входных, выходных и возмущающих воздействий.

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара высокого давления и выработку пара среднего давления, конденсата (установка тип «УВС») [8].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления $G_{п}^{вх}$.

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой пара среднего давления $G_{пс}^{вых}$, расход генерируемого установкой конденсата $G_{к}^{вых}$.

Промежуточными величинами выступают: температура генерируемого установкой пара среднего давления $T_{пс}^{вых}$, давление генерируемого установкой пара среднего давления $P_{пс}^{вых}$, давление генерируемого установкой конденсата $P_{к}^{вых}$, расход пара высокого давления безвозвратных потерь $G_{п}^{пм}$, теплота собственного потребления $Q_{сн}$.

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки T_b ; температура поступающего на установку пара высокого давления $T_{п}^{вх}$; давление подаваемого на установку пара высокого давления $P_{п}^{вх}$.

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 3.

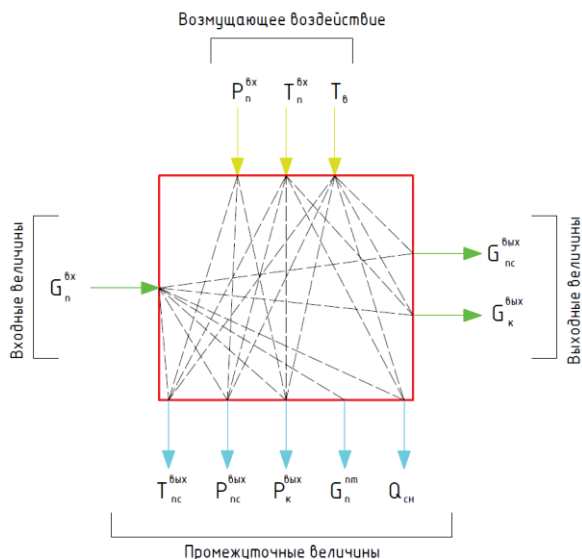


Рис. 3. Установка «УВС» в виде объекта управления
 Fig. 3. Plant of the «УВС» type as a control object

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара высокого давления и выработку конденсата (установка тип «УВК») [8, 9].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления $G_{п}^{вх}$.

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой конденсата $G_{к}^{вых}$.

Промежуточными величинами выступают: температура генерируемого установкой конденсата $T_{к}^{вых}$, давление генерируемого установкой конденсата $P_{к}^{вых}$, расход пара высокого давления безвозвратных потерь $G_{пн}^{пт}$; теплота собственного потребления $Q_{сн}$.

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки T_b ; температура поступающего на установку пара высокого давления $T_{п}^{вх}$; давление подаваемого на установку пара высокого давления $P_{п}^{вх}$.

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 4.

Рассмотрим установку, которая производит потребление пара среднего давления и выработку конденсата (установка тип «УС») [10].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара среднего давления $G_{пс}^{вх}$.

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой конденсата $G_{к}^{вых}$.

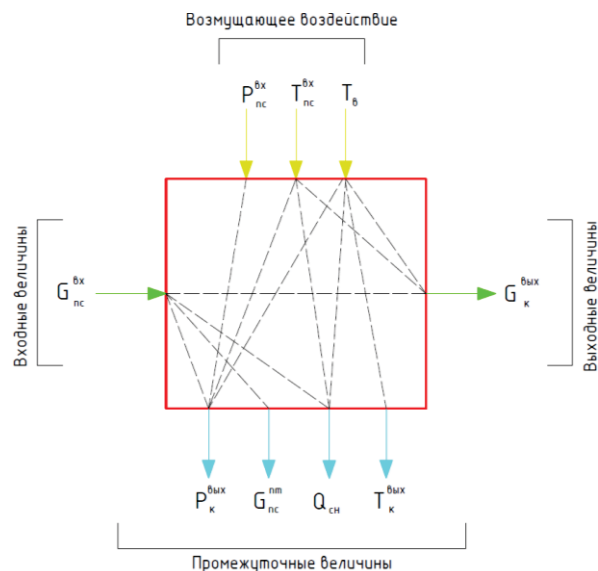


Рис. 4. Установка «УВК» в виде объекта управления
 Fig. 4. Plant of the «УВК» type as a control object

Промежуточными величинами выступают: давление генерируемого установкой конденсата $P_{к}^{вых}$, расход пара среднего давления безвозвратных потерь $G_{пс}^{пт}$, теплота собственного потребления $Q_{сн}$.

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки T_b ; температура поступающего на установку пара среднего давления $T_{пс}^{вх}$; давление подаваемого на установку пара среднего давления $P_{пс}^{вх}$.

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 5.

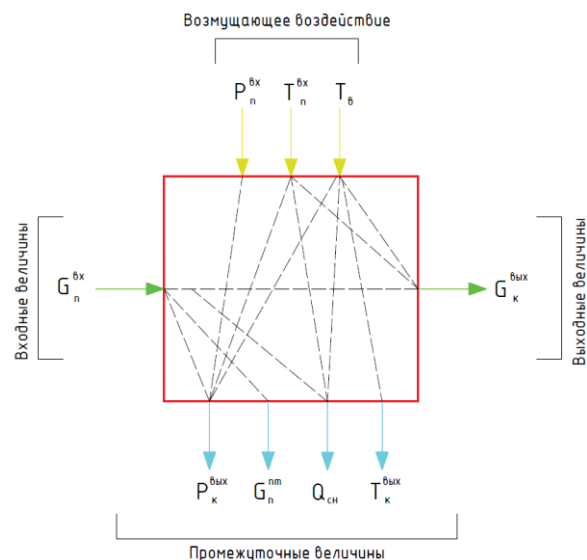


Рис. 5. Установка «УС» в виде объекта управления
 Fig. 5. Plant of the «УС» type as a control object

Рассмотрим редукционно-охладительную установку, которая потребляет пар высокого давления, водопроводную воду и производит пар среднего давления [11].

Данный объект имеет следующие входные величины: расход поступающего на установку пара высокого давления $G_{пв}^{вх}$; расход воды $G_{вод}$.

Выходными величинами для данного объекта выступают: расход генерируемого установкой пара среднего давления $G_{пс}^{вых}$; давление генерируемого установкой пара среднего давления $P_{пс}^{вых}$; температура генерируемого установкой пара среднего давления $T_{пс}^{вых}$.

Промежуточными величинами выступают: теплота собственного потребления $Q_{сн}$.

Для данного объекта возмущающими воздействиями являются: температура воздуха снаружи установки $T_{в}$; температура поступающего на установку пара высокого давления $T_{п}^{вх}$; давление подаваемого на установку пара высокого давления $P_{п}^{вх}$; температура подаваемой воды $T_{вод}$.

Схема установки в виде объекта управления приведена на рис. 6.

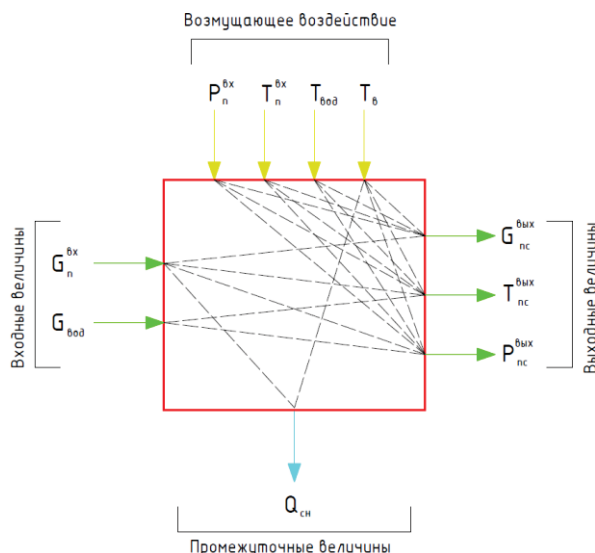


Рис. 6. Редукционно-охладительная установка в виде объекта управления

Fig. 6. Reduction and cooling unit as a control object

В результате анализа схемы парораспределения как объекта управления поставлена следующая задача.

Необходимо найти такое суммарное управляющее воздействие на систему установок, при котором производственная мощность нефтепереработки поддерживается на заданном уровне при условии сокращения использования внешних энергетических ресурсов и полного использования энергии, генерируемой внутри предприятия. Обязательным условием является необходимость поддержания заданного давления пара, подаваемого на установки.

Структура автоматизированной системы управления и основные технические решения программно-технического комплекса

В рамках реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом пароснабжения предлагаются следующие подходы:

При падении давления в магистрали пара высокого давления (1) происходит наращивание объема пара, генерируемого котельными. При достижении максимального расхода пара внутренней выработки и недостаточном давлении в системе пара высокого давления происходит подпитка магистрали со стороны внешнего источника пара [12].

$$G_{пвд}(t) > \sum_{i=1}^N G_{п}^{вых}[i](t). \quad (1)$$

При падении давления в магистрали пара среднего давления (2) происходит увеличение производительности установок, генерирующих пар среднего давления при условии «запаса» по расходу пара высокого давления не менее 10 % [13].

$$G_{псд}(t) > \left(G_{пс}^{вых}[0.1](t) + \sum_{j=1}^M G_{пс}^{вых}[1.j](t) + \sum_{k=1}^P G_{пс}^{вых}[2.k](t) \right). \quad (2)$$

При падении давления в магистрали пара высокого давления при условии максимальной внутренней выработки пара высокого давления и максимальном расходе пара внешней выработки (3) предусмотрено отключение работающих установок в соответствии с таблицей приоритетов [13, 14].

$$G_{пвд}(t) > \left[\sum_{i=1}^N G_{п}^{вых}(t) + [i]G_{п}^{вн}(\max) \right]. \quad (3)$$

Управление клапанной системой пара высокого давления внешней генерации, редукционно-охладительными установками и внутренними котельными осуществляется по ПИ-закону регулирования.

Параллельно производится локальное управление параметрами пара, подаваемого на каждую из установок технологического процесса по ПИД-закону регулирования [15].

$G_{пвд}$ – суммарный (расчетный) расход пара высокого давления; $G_{псд}$ – суммарный (расчетный) расход пара среднего давления; $G_{псд}^{псд}$ – суммарный (расчетный) расход конденсата, выработанного из пара среднего давления; $G_{пвд}^{псд}$ – суммарный (расчетный) расход конденсата, выработанного из пара высокого давления.

Предлагаемая структура системы управления представлена на рис. 7.

Для реализации данной системы на уровне локальных регуляторов поступающего на установки пара предлагается программно-технический комплекс на базе контроллеров, модулей ввода/вывода Siemens Logo, представляющий собой локальную систему автоматизированного управления.

В качестве основного контроллера предлагается использовать программно-технический комплекс на базе контроллеров и модулей ввода/вывода Siemens Simatic S7-1200.



Рис. 7. Функционально-структурная схема управления
Fig. 7. Functional-structural control scheme

Реализовать предложенный алгоритм предлагается на языках стандарта IEC 61131-3 в среде программирования Siemens [16].

Состав контрольно-измерительных приборов и аппаратов (КИПиА) системы:

- 1) преобразователи избыточного давления;
- 2) преобразователи температуры;
- 3) преобразователи расхода;
- 4) преобразователи дифференциального давления;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вережкин А.П., Муртазин Т.М., Насибуллин Ф.Г. Модернизация систем управления и обеспечения безопасности как инструмент повышения эффективности процессов переработки нефти и газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2019. – № 10. – С.12–17.
2. Sharma K.L.S. Overview of industrial process automation. – Amsterdam: Elsevier Science, 2011. – 320 p.
3. Управление инновационным развитием наукоемкой производственной системы / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, О.В. Дмитриева, В.Р. Разиева, М.В. Сивова // Вопросы современной науки и практики. – 2016. – № 3 (61). – С. 146–152.
4. Фарунцев С.Д. Опыт применения методов математического моделирования для построения комплексных моделей управления объектами промышленной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 7–21.
5. Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry // Procedia. Computer Science. – 2017. – V. 109. – P. 745–753.
6. Джамбеков А.М., Дмитриевский Б.С. Моделирование автоматической системы регулирования температуры процесса стабилизации катализатора в условиях неопределенности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 26–33.
7. Развитие перспективной автоматизации в нефтегазовой отрасли / Е.И. Громаков, Т.Е. Мамонова, А.В. Липиниш, А.В. Рымшин // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 10. – С. 98–102.

5) клапаны регулирующие седельные различного диаметра условного прохода.

Наиболее подходящие КИПиА, сертифицированные для использования на предприятиях добычи и переработки нефти, выпускает японское предприятие Yokogawa.

В качестве интерфейса и протокола информационного обмена между нижним и средним уровнем системы управления предлагается использовать RS-485 и Modbus RTU для минимизации рисков, связанных со значительными длинами кабельных линий.

Для осуществления промежуточного контроля параметров теплоносителя на протяженном паропроводе предлагается использование беспроводных промышленных преобразователей с системой ретрансляторов и базовой станций, представляющих собой распределенную беспроводную ячеистую сеть [17, 18].

Применение беспроводных технологий, в частности IoT, позволит существенно увеличить наблюдаемость объекта управления и снизить затраты на реализацию предложенной системы управления [19, 20].

Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрен технологический процесс пароснабжения как объект управления путем декомпозиции на отдельные установки, для каждой из которых был определен вектор входных, выходных, промежуточных и возмущающих величин. На основе полученных в ходе работы данных были сформулированы основные подходы к управлению технологическим процессом, предложена структура системы автоматизированного управления и основные элементы программно-технического комплекса.

8. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, А.В. Костенко, Е.М. Юрьев, В.С. Бесков // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41–46.
9. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, О.Е. Митянина, Е.А. Кузьменко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
10. Грачев Ю.П., Тубольцев А.К., Тубольцев В.К. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов. – М.: Изд-во «Легкая и пищевая промышленность», 1984. – 216 с.
11. Иванец К.Я., Лейбо А.Н. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. – СПб.: Изд-во «Химия», 1966. – 343 с.
12. Задача управления процессом каталитического риформинга и метод ее решения / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, А.Г. Кокуев, А.М. Джамбеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 59–67.
13. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Изд-во «Наука», 2002. – 303 с.
14. Жоров Ю.М. Расчеты и исследования каталитических процессов нефтепереработки. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 216 с.
15. Mbihi J. Analog automation and digital feedback control techniques. – New York: Wiley-ISTE, 2018. – 256 p.
16. John K.-H., Tiegkamp M. IEC 61131-3: programming industrial automation systems. Concepts and programming languages. – Luxembourg: Springer, 2010. – 240 p.

17. Machine learning for wireless communications in the Internet of Things: a comprehensive survey / J. Jagannath, N. Polosky, A. Jagannath, F. Restuccia, T. Melodia // Ad Hoc Networks. – 2019. – V. 93. – P. 1–46.
18. Budampati R., Kolavennu S. Industrial wireless sensor networks: monitoring, control and automation. – Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. – 235 p.
19. Delsing J. IoT automation: arrowhead framework. – Boca Raton: CRC, 2017. – 400 p.
20. Imran M.A., Hussain S., Abbasi Q.H. Wireless automation as an enabler for the next industrial revolution. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2020. – 288 p.

Поступила 15.05.2022 г.

Информация об авторах

Матвейкин В.Г., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных процессов и управления, Тамбовский Государственный технический университет.

Краснянский М.Н., доктор технических наук, профессор, ректор, Тамбовский Государственный технический университет.

Дмитриевский Б.С., доктор технических наук, профессор кафедры информационных процессов и управления, Тамбовский Государственный технический университет.

Василевский К.С., аспирант кафедры информационных процессов и управления, Тамбовский Государственный технический университет.

UDC 681.5.017

STEAM SUPPLY SYSTEM OF AN OIL REFINERY AS A CONTROL OBJECT

Valeriy G. Matveykin¹,
ipu_tstu@mail.ru

Mikhail N. Krasnyansky¹,
tstu@tstu.ru

Boris S. Dmitrievsky¹,
dmiboris@yandex.ru

Konstantin S. Vasilevskiy¹,
kvasilevskii@yandex.ru

¹ Tambov State Technical University,
106/5, corp. 2, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop and implement an automated control system for the steam supply process to implement optimal management of energy resources – medium and high-pressure steam. At the moment, the resource management system looks like a disparate local system of automated control with feedback that stabilizes the coolant parameters at the time of supply to the installation. Research in this direction will allow forming a centralized approach to managing the technological process of steam supply and improving the technical and economic indicators of oil refineries.

The main aim of the research is to develop an automated control system for the steam supply process that would reduce the use of steam from external generation and maximize the use of internal resources of the enterprise. It is proposed that the developed automated control system is aimed at improving the energy efficiency of steam-consuming industries.

Object: a steam supply system of an oil refinery, including consumers and generators of medium and high-pressure steam connected in series and in parallel with a pipeline system.

The research methods are based on a mathematical description of the installations involved in the technological process of steam supply, computational mathematics, and the theory of automatic control, as well as modern approaches to the control of the technological process.

Results. Decomposition of the technological process of steam supply into separate installations was carried out. Each element was considered as a control object, vectors of input, output, intermediate values and disturbing effects were determined. The main algorithm, structure of the control system and the main elements of the software and hardware complex are proposed.

Key words:

Steam supply system, control system, steam condensate balance, control object, high pressure steam, medium pressure steam.

REFERENCES

- Verevkin A.P., Murtazin T.M., Nasibullin F.G. Advanced process control and safety systems as a tool for increased oil and gas processing efficiency. *Territory Neftegaz*, 2019, no. 10, pp. 12–17. In Rus.
- Sharma K.L.S. *Overview of industrial process automation*. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 2011. 320 p.
- Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Dmitrieva O.V., Raziya V.R., Sivova M.V. Management of innovative development of knowledge-based production system. *Issues of modern science and practice*, 2016, no. 3 (61), pp. 146–152. In Rus.
- Faruntsev S.D. Experience in application of mathematical modeling methods for elaboration of integrated control models of field treatment facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
- Redutskiy Y. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry. *Procedia. Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745–753.
- Dzhambekov A.M., Dmitrievsky B.S. Simulation of an automatic temperature control system for the stabilization catalysate process in conditions of uncertainty. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 26–33. In Rus.
- Gromakov E.I., Mamonova T.E., Liepinish A.V., Rimshin A.V. Development of advanced automation in the oil and gas industry. *Oil industry*, 2019, no. 10, pp. 98–102. In Rus.
- Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Kostenko A.V., Yuriev E.M., Beskov V.S. Matematicheskoe modelirovanie kataliticheskikh protsessov pererabotki uglevodorodnogo syrya [Mathematical modeling of catalytic processes of processing of hydrocarbon raw materials]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 41–46.
- Usheva N.V., Moizes O.E., Mityanina O.E., Kuzmenko E.A. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tehnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical and technological processes]. Tomsk. Tomsk Polytechnic University Publ., 2014. 135 p.
- Grachev Y.P., Tuboltsev A.K., Tuboltsev V.K. *Modelirovanie i optimizatsiya teplo- i massoobmennyykh protsessov* [Modeling and optimization of heat and mass transfer processes]. Moscow, Light and food industry Publ., 1984. 216 p.
- Ivanets K.Y., Leibo A.N. *Oborudovanie neftepererabatyvayushchikh zavodov i ego ekspluatatsiya* [Equipment of oil refineries and its operation]. St Petersburg, Khimiya Publ., 1966. 343 p.
- Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Kokuev A.G., Dzhambekov A.M. Problem of control of catalytic reforming and method of its solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 59–67. In Rus.
- Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost i upravlenie* [Robust stability and control]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p.
- Zhorov Yu.M. *Raschety i issledovaniya kataliticheskikh protsessov neftepererabotki* [Calculations and studies of catalytic processes of oil refining]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 216 p.
- Mbihi J. *Analog automation and digital feedback control techniques*. New York, Wiley-ISTE, 2018. 256 p.
- John K.-H., Tiegkamp M. *IEC 61131-3: programming industrial automation systems. Concepts and programming languages*. Luxembourg, Springer Publ., 2010. 240 p.
- Jagannath J., Polosky N., Jagannath A., Restuccia F., Melodia T. Machine learning for wireless communications in the Internet of

- Things: a comprehensive survey. *Ad Hoc Networks*, 2019, vol. 93, pp. 1–46.
18. Budampati R., Kolavennu S. *Industrial wireless sensor networks: monitoring, control and automation*. Amsterdam, Elsevier Ltd Publ., 2016. 235 p.
19. Delsing J. *IoT automation: arrowhead framework*. Boca Raton, CRC Publ., 2017. 400 p.
20. Imran M.A., Hussain S., Abbasi Q.H. *Wireless automation as an enabler for the next industrial revolution*. Hoboken, Wiley-IEEE Press Publ., 2020. 288 p.

Received: 15 May 2022.

Information about the authors

Valeriy G. Matveykin, Dr. Sc., professor, head of the department, Tambov State Technical University.

Mikhail N. Krasnyansky, Dr. Sc., professor, rector, Tambov State Technical University.

Boris S. Dmitrievsky, Dr. Sc., professor, Tambov State Technical University.

Konstantin S. Vasilevskiy, postgraduate student, Tambov State Technical University.