УДК 681.5

А.Ю. Факеев, Н.В. Лежнева

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛОМ СМЕШЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Факеев Александр Юрьевич, магистр Нижнекамского химико-технологического института ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ»). Имеет статьи в области автоматизации технологических процессов. [e-mail: alexandr071189@gmail.com].

Лежнева Наталья Викторовна, кандидат технических наук, окончила факультет технической кибернетики и информатики Казанского авиационного института. Доцент НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ». Имеет статьи в области моделирования и автоматизации технологических процессов. [e-mail: nlegneva@list.ru].

Аннотация

На основе проведенного анализа существующей распределенной системы управления узлом смешения дизельного топлива выявлено несовершенство контуров регулирования расхода керосиновой фракции, депрессорно-диспергирующей, цетаноповышающей и противоизносной присадок вследствие того, что в них не учитываются показатели качества товарного дизтоплива при наличии в автоматизированной системе поточных анализаторов его характеристик, что приводит к необходимости участия оператора в управлении расходом указанных потоков. В связи с этим проведено моделирование узла на основе экспериментально-статистических методов, по результатам которого разработан виртуальный анализатор смазывающей способности товарного дизтоплива. Сформулированы предложения по модернизации контуров регулирования расходом депрессорно-диспергирующей и цетаноповышающей присадок, керосиновой фракции с корректировкой по качественным характеристикам товарного дизельного топлива, а также расхода противоизносной присадки с коррекцией по результатам показаний разработанного виртуального анализатора смазывающей способности горючего. Разработаны программы для реализации модернизированных контуров регулирования на языке функциональных блоков контроллера Centum VP.

Ключевые слова: дизельное топливо, присадка, виртуальный анализатор, система управления, контур регулирования.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-3-65-26-32

MODERNIZATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE DIESEL FUEL MIXING UNIT

Aleksandr Iurevich Fakeev, Master of the Nizhnekamsk Institute of Chemical Engineering and Technology at Kazan National Research Technological University; an author of articles in the field of workflow automation. e-mail: alexandr071189@gmail.com.

Natalia Viktorovna Lezhneva, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Technical Cybernetics and Informatics of the Kazan Aviation Institute; Associate Professor of the Nizhnekamsk Institute of Chemical Engineering and Technology at Kazan National Research Technological University; an author of articles in the field of modeling and workflow automation. e-mail: nlegneva@list.ru.

Abstract

Based on the analysis of the existing distributed control system of the diesel fuel mixing unit, the imperfection of the control loops of the kerosene fraction, the depressant-dispersant, cetane-increasing and antiwear additives were revealed due to the fact that they do not take into account the quality indicators of commercial diesel fuel if there are in-line analyzers of its characteristics in the automated system. It leads to the need for the operator to participate in the control of the flow rate of these flows. In this regard, the unit was simulated on the basis of experimental and statistical methods, based on the results of which a virtual analyzer of the lubricity of commercial diesel fuel was developed. Proposals have been formulated for the modernization of control loops with the consumption of depressant-dispersant and cetane-increasing additives, kerosene

fraction, adjusted for the qualitative characteristics of commercial diesel fuel, as well as the consumption of antiwear additives, corrected according to the results of the readings of the developed virtual analyzer of the lubricity of fuel. Programs for the implementation of modernized control loops in the language of functional blocks of the Centum VP controller have been developed.

Keywords: diesel fuel, additive, virtual analyzer, control system, control loop.

ВВЕДЕНИЕ

Дизельное топливо применяется в автомобильном, строительном и железнодорожном транспорте, сельхозтехнике, военной технике и речных, а также морских судах как топливо для котельных станций и в качестве смазочно-охлаждающей жидкости в некоторых процессах обработки металла [1]. Большая востребованность дизтоплива объясняется его высокими эксплуатационными и экономическими показателями, а также широкой сферой применения.

Технология производства дизельного топлива состоит из нескольких этапов, последним из которых является смешение (компаундирование). Продукты прямой нефтепереработки и крекинга смешиваются в требуемых пропорциях с добавлением различных присадок [2–5]: противоизносных (компенсируют потерю серы, предохраняющую мотор от чрезмерного износа); цетаноповышающих (обеспечивают полноту сгорания горючего и улучшают запуск двигателя); антистатических (ускоряют прокачку горючего без создания пожароопасности); диспергирующих (позволяют устранять ароматические углеводороды); моющих (поддерживают чистоту мотора и продлевают срок работоспособности топливной системы).

В 2020 году в Российской Федерации объем производства дизельного топлива составил 77,9 миллиона тонн [6], из которых 3,44 миллиона тонн приходится на НПЗ АО «ТАНЕКО». На нефтеперерабатывающем заводе АО «ТАНЕКО» производится несколько видов дизельного топлива стандарта «Евро-5», адаптированных под определенные климатические условия: летнее, межсезонное, зимнее и арктическое.

Потребительский рынок диктует дальнейшее повышение качества данного продукта нефтепереработки. В связи с этим актуальной является задача увеличения эффективности технологического оборудования методами оптимального управления с целью получения товарного дизельного топлива, соответствующего отечественным и международным стандартам.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛОМ СМЕШЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

На узле смешения дизтоплива нефтехимического комплекса «ТАНЕКО» получение товарного дизельного топлива осуществляется путем смешения дизельной и керосиновой фракций и пакета присадок в смесителях

М03, М04 в соответствии с утвержденными расходными нормами в виде соотношения: литр присадки на кубический метр базового компонента. Соотношения рассчитываются отделом главного технолога АО «ТАНЕКО» по результатам анализа испытательной лабораторией нефтепродуктов и остаются неизменными при производстве соответствующего вида дизельного топлива. Узел смешения подвержен существенным возмущающим воздействиям по расходу дизельной и керосиновой фракций, качеству базовых компонентов дизтоплива, кроме того характеристики добавляемых присадок значительно различаются в зависимости от технологии изготовления, производителя и т. п. Контроль качества товарного дизельного топлива осуществляется промышленной лабораторией качества, а также поточными анализаторами АТ01, АТ02 по следующим физико-химическим показателям: фракционный состав, плотность, температура вспышки, предельная температура фильтруемости, цетановое число, температура помутнения.

В существующей распределенной системе управления узлом смешения дизельного топлива на базе контроллера Centum VP [7] в АО «ТАНЕКО» реализованы контуры регулирования расхода керосиновой фракции, цетаноповышающей, депрессорно-диспергирующей и противоизносной присадок в смесителе М03/04 в определенном соотношении с расходом дизельной фракции без учета качественных характеристик товарного горючего. С целью повышения качества товарного дизтоплива, минимизации участия оператора в управлении узлом предлагается следующая модернизация контуров регулирования расходов керосиновой фракции, цетаноповышающей и депрессорно-диспергирующей присадок путем введения в контуры регулирования анализаторов: расход депрессорно-диспергирующей присадки по соотношению с расходом дизельной фракции с корректировкой по температуре фильтруемости; расход керосиновой фракции по соотношению с расходом дизельной фракции с корректировкой по температуре помутнения; расход цетаноповышающей присадки по соотношению с расходом дизельной фракции с корректировкой по значению цетанового числа.

Программа регулирования расхода цетаноповышающей присадки по соотношению с расходом дизельной фракции с коррекцией по цетановому числу товарного дизельного топлива, реализованная на языке функциональных блоков контроллера Centum VP приведена

Рис. 1. Программа регулирования расхода цетаноповышающей присадки

на рисунке 1, где %AI22 – блок связи входного измеренного значения цетанового числа дизельного топлива; AI22 – блок индикатора цетанового числа для вывода показания средства измерения на мнемосхему; %FI33 – блок связи входного измеренного значения расхода дизельной фракции; FI33C – блок индикатора расхода дизельной фракции; %FI02 – блок связи входного измеренного значения расхода цетаноповышающей присадки; FI02 – блок индикатора расхода цетаноповышающей присадки; AIC22 – блок ПИД-регулятора цетанового числа дизельного топлива; FIC02R – блок ПИД-регулятора расхода цетаноповышающей присадки; FI22R – блок соотношения расходов дизельной фракции и присадки, выходной сигнал которого в виде расхода цетаноповышающей присадки идет на управление уставкой ПИД-регулятора FIC02R; %FV02 – выходной сигнал на частотный преобразователь электродвигателя дозировочного насоса (блок связи выходного управляющего воздействия ПИД-регулятора FIC02R с исполнительным устройством).

Разработанный алгоритм контура регулирования расхода депрессорно-диспергирующей присадки по соотношению с расходом дизельной фракции с коррекцией по предельной температуре фильтруемости дизельного топлива, выполненный на языке функциональных блоков контроллера Centum VP, представлен на рисунке 2, где

%AI11 – блок связи входного измеренного значения предельной температуры фильтруемости товарного дизельного топлива; AI11 – блок индикатора предельной температуры фильтруемости дизельного топлива; %FI34 – блок связи входного измеренного значения расхода дизельного топлива; FI34 – блок индикатора расхода топлива; %FI23 – блок связи входного измеренного значения расхода депрессорно-диспергирующей присадки; FI23 – блок индикатора расхода депрессорно-диспергирующей присадки; AIC11 – блок ПИД-регулятора предельной температуры фильтруемости товарного топлива (нижний и верхний пределы выходного сигнала AIC11 изменены под необходимые границы соотношения расходов: AIC11.MSL = 5, AIC11.MSH = 0); FCL – вычислительный блок, определяющий уставку регулятора FIC23R в виде необходимого расхода депрессорно-диспергирующей присадки; FIC23 – блок ПИД-регулятора расхода депрессорно-диспергирующей присадки; %FV23 – выходной сигнал на частотный преобразователь электродвигателя дозировочного насоса (блок связи выходного управляющего воздействия ПИД-регулятора FIC23R с исполнительным устройством).

Так как определение смазывающей способности товарного дизельного топлива, характеризуемой диаметром пятна износа, осуществляется экспериментальным методом с периодичностью раз в сутки, то предлагается

Рис. 2. Программа регулирования расхода депрессорно-диспергирующей присадки

регулирование расхода противоизносной присадки по соотношению с расходом дизельной фракции осуществлять с коррекцией по значению диаметра пятна износа, определяемому виртуальным анализатором смазывающей способности.

Построение виртуального анализатора смазывающей способности дизтоплива выполнено с использованием экспериментально-статистических методов моделирования. Обследование узла смешения дизельного топлива для построения математической модели проведено на основе корреляционного и регрессионного анализа данных промышленной эксплуатации узла. Исходными данными для построения модели являются значения режимных параметров узла смешения и результатов лабораторного анализа промышленной лабораторией качества, взятые с заводского сервера за период с 01.05.2020 по 30.05.2021 г. Для оценки силы линейной связи между параметрами процесса рассчитаны выборочные коэффициенты корреляции. Результаты проведенного корреляционного анализа архивных данных свидетельствуют о том, что на смазывающую способность (диаметр пятна износа) дизтоплива наиболее существенно влияют следующие факторы: расходы противоизносной присадки, дизельной и керосиновой фракций. Следовательно, уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3,$$

где y – диаметр пятна износа, x_1 – расход противоизносной присадки, x_2 – расход керосиновой фракции, x_3 – расход дизельной фракции.

Перед проведением регрессионного анализа полученные с сервера архивные параметры узла смешения за указанный период предварительно обработаны, т. к. периодичность опроса датчиков расхода – одна секунда, а экспериментальное определение смазывающей способности топлива – раз в сутки. В результате обработки архивных данных сформирована выборка объемом 300. Расчет коэффициентов уравнения регрессии выполнялся методом наименьших квадратов в приложении Microsoft Excel, т. е. из условия: $\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$, где y_i – архивные значения диаметра пятна износа, N – объем выборки.

Полученное уравнение линейной регрессии $\hat{y} = -0,4948 - 6,22313x_1 + 0,426727x_2 + 4,369976x_3$ предлагается реализовать в автоматизированной системе управления узлом в виде расчетного блока программы регулирования расхода противоизносной присадки контроллера Centum VP.

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессионного уравнения выполнена по t -критерию Стьюдента, расчетные значения которого $t_{b_0} = 2,03$; $t_{b_1} = 25,14$; $t_{b_2} = 4,05$; $t_{b_3} = 26,07$ превосходят его табличное значение с $(N - k - 1)$ степенями свободы ($k = 3$ – число факторов) при уровне значимости $p = 0,05$, равное 1,97, что говорит о значимости коэффициентов.

Адекватность уравнения регрессии проверена по критерию Фишера [8], расчетное значение которого $F = 2,81$ превышает его табулированное значение при уровне значимости 0,05, равное 2,64, что

Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений диаметра пятна износа

Рис. 4. Программа регулирования расхода противоизносной присадки

свидетельствует об адекватности полученного уравнения регрессии. Рассчитанное значение коэффициента детерминации, равное 0,8, также подтверждает достаточно высокое качество построенной регрессионной модели. Сравнение расчетных (показаний виртуального анализатора) и экспериментальных значений диаметра пятна износа приведено на рисунке 3. Средняя ошибка аппроксимации составляет 3,54%.

Программа работы предлагаемого контура регулирования расхода противоизносной присадки по соотношению с расходом дизельной фракции с коррекцией по прогнозу смазывающей способности дизельного топлива виртуальным анализатором диаметра пятна износа на языке функциональных блоков контроллера Centum VP приведена на рисунке 4, на котором использованы следующие обозначения функциональных блоков:

Рис. 5. Программа регулирования расхода керосиновой фракции

%%FI32 – блок связи входного измеренного значения расхода керосиновой фракции; %%FI26 – блок связи входного измеренного значения расхода противоизносной присадки; FI32PVI – блок индикатора расхода керосиновой фракции; FI33PVI – блок индикатора расхода дизельной фракции; FI26 – блок индикатора расхода противоизносной присадки; URREGRES – вычислительный блок, выходной сигнал которого рассчитывается по уравнению регрессии и поступает на вход ПИД-регулятора AIC26; AIC26 – блок ПИД-регулятора смазывающей способности дизельного топлива (диаметра пятна износа); FI26R – блок соотношения расходов дизельной фракции и присадки, выходной сигнал которого в виде расхода противоизносной присадки на управление уставкой ПИД-регулятора FIC26; FIC26 – блок ПИД-регулятора расхода противоизносной присадки; %%FV26 – выходной сигнал на частотный преобразователь электродвигателя дозирочного насоса (блок связи выходного управляющего воздействия ПИД-регулятора FIC26 с исполнительным устройством).

Программа регулирования расхода керосиновой фракции по соотношению с расходом дизельной фракции с коррекцией по температуре помутнения дизтоплива на языке функциональных блоков контролле-

ра Centum VP представлена на рисунке 5, на котором %%AI15 – блок связи входного измеренного значения температуры помутнения; AI15 – блок индикатора температуры помутнения товарного дизтоплива; %%FI32 – блок связи входного измеренного значения расхода топлива; FI32 – функциональный блок индикатора регулятора расхода дизельного топлива; %%FI31 – блок связи входного измеренного значения расхода керосиновой фракции; AIC15 – блок ПИД-регулятора температуры помутнения продукта; FIC31 – блок ПИД-регулятора расхода керосиновой фракции; FI31R – блок соотношения расходов дизельной фракции и керосиновой фракции, выходной сигнал которого в виде расхода керосиновой фракции поступает на управление уставкой ПИД-регулятора FIC31; %%FV31 – выходной сигнал на частотный преобразователь электродвигателя дозирочного насоса (блок связи выходного управляющего воздействия ПИД-регулятора FIC31 с исполнительным устройством).

Настроечные параметры ПИД-регуляторов указанных контуров регулирования постоянны, но при существенном изменении технологического режима узла смешения дизельного топлива параметры могут быть скорректированы со станции инженера PCY (ENG) уровня диспетчерского управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается модернизация существующей распределенной системы управления узлом смешения дизтоплива на базе контроллера Centum VP на НПЗ АО «ТАНЕКО» путем введения в контуры регулирования расхода керосиновой фракции, цетаноповышающей и депрессорно-диспергирующей присадок корректировки по показателям качества промышленных анализаторов товарного дизельного топлива, а также в контур расхода противоизносной присадки коррекции по результатам расчета диаметра пятна износа виртуальным анализатором смазывающей способности дизтоплива, разработанным на основе регрессионного анализа. Модернизация указанных контуров автоматических систем регулирования позволит повысить качество товарного дизельного топлива и исключить участие оператора в управлении расходом указанных компонентов товарного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение дизельного топлива. URL: <https://infostroj.org/primenenie-dizelnogo-topliva> (дата обращения: 15.06.2021).
2. Особенности современной технологии получения дизельного топлива. URL: <https://ammox.ru/articles/tekhnologii-polucheniya-dizelnogo-topliva> (дата обращения: 15.06.2021).
3. Потехин В.В., Потехин В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. СПб. : Лань, 2014. 887 с.
4. Шадрина А.В., Крец В.Г. Основы нефтегазового дела. М. : Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2013. 262 с.
5. Химия нефти и газа / А.И. Богомолов, А. Гайле, В.В. Громова [и др.]. СПб. : Химия, 1995. 448 с.
6. Производство дизельного топлива в 2020 году. URL: <https://www.interfax.ru/business/746788> (дата обращения: 15.06.2021).
7. Technical Information Integrated Production Control System CENTUM VP System Overview. URL: <https://web-material3.yokogawa.com/TI33J01A10-01EN.pdf> (дата обращения: 15.07.2021).
8. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М. : Химия, 1985. 448 с.

REFERENCES

1. *Primenenie dizelnogo topliva*. Available at: <https://infostroj.org/primenenie-dizelnogo-topliva> (accessed 15.06.2021).
2. *Osobennosti sovremennoi tekhnologii polucheniia dizelnogo topliva*. Available at: <https://ammox.ru/articles/tekhnologii-polucheniya-dizelnogo-topliva> (accessed 15.06.2021).
3. Potekhin V.V., Potekhin V.M. *Osnovy teorii khimicheskikh protsessov tekhnologii organicheskikh veshchestv i neftepererabotki* [Fundamentals of the Theory on Chemical Processes of the Technology of Organic Substances and Oil Processing]. St. Petersburg, Lan Publ., 2014. 887 p.
4. Shadrina A.V., Krets V.G. *Osnovy neftegazovogo dela* [Fundamentals of Oil and Gas Engineering]. Moscow, Natsionalnyi Otkrytyi Universitet "INTUIT" Publ., 2013. 262 p.
5. Bogomolov A.I., Gaile A.A., Gromova V.V. et al. *Khimiia nefti i gaza* [Oil and Gas Chemistry]. St. Petersburg, Khimiia Publ., 1995. 448 p.
6. *Proizvodstvo dizelnogo topliva v 2020 godu* [Production of Diesel Oil in 2020]. Available at: <https://www.interfax.ru/business/746788> (accessed 15.06.2021).
7. *Technical Information Integrated Production Control System CENTUM VP System Overview*. Available at: <https://web-material3.yokogawa.com/TI33J01A10-01EN.pdf> (accessed 15.07.2021).
8. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Cybernetics Methods in Chemistry and Chemical Technology]. Moscow, Khimiia Publ., 1985. 448 p.