DOI: 10.18522/syssyn-2022-6

Разработка диагностической модели для подсистем содорегенерационного котлоагрегата

Ковалёв Дмитрий Александрович
Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
d.a.kovalyov@yandex.ru

Русинов Леон Абрамович
Факультет информационных технологий и управления
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
lrusinov@yandex.ru

Куркина Виктория Вадимовна
Факультет информационных технологий и управления
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
victoria.kurkina@gmail.com

Аннотация. **Задача выявления и идентификации возможных нештатных ситуаций для содорегенерационного котлоагрегата (СРК) является актуальной, ввиду того, что технологические процессы СРК потенциально опасны. Таким образом, разработка системы диагностики, работающей в реальном времени, даст возможность не только на ранних стадиях выявлять отклонения от нормального характера протекания технологического процесса в СРК, но и определять их причины и выдавать рекомендации для оперативного управления процессом с целью ликвидации этих нарушений. В результате были разработаны диагностические модели подсистем СРК в виде иерархической фреймово-продукционной структуры. Разработанные диагностические модели для подсистемы зеленого и белого щелока протестированы с помощью системы имитационного моделирования.**

Abstract. **The task of detection and identification of possible abnormal situations for the recovery boiler (RB) is relevant, due to the fact that technological processes of RB are potentially dangerous. Thus, the development of diagnostic system, working in real time, will make it possible not only at the early stages to identify deviations from the normal course of the technological process in RB, but also to determine their causes and issue recommendations for operational management of the process in order to eliminate these violations. As a result, diagnostic models of RB subsystems in the form of a hierarchical frame-production structure were developed. The developed diagnostic models for the green and white liquor subsystems were tested using a simulation system.**

Ключевые слова: содорегенерационный котел, декомпозиция, диагностическая модель, фреймово-продукционная структура, нештатная ситуация.

Keywords: recovery boiler, decomposition, diagnostic model, frame-production structure, contingency situation.

I. Введение

Системы диагностики технологических процессов реальных объектов управления (ОУ) получают широкое распространение на различных промышленных предприятиях, т.к. обеспечивают возможность эффективной и безопасной эксплуатации ОУ. Архитектура систем диагностики опирается на диагностические модели (ДМ), которые связывают нарушение с симптомами [1–3], при этом наиболее часто используются модели на основе данных процесса, в частности экспертные диагностические системы [1–4], которые позволяют в условиях неполной информации о технологическом процессе выполнить описание ситуаций на параметрическом уровне и ранжировать симптомы по их важности.

Содорегенерационный котлоагрегат (СРК) является важным элементом цикла регенерации химикатов сульфат-целлюлозного производства и предназначен для регенерации (восстановления свойств) черного щелока, отработанного в процессе варки целлюлозы [5].

Технологические процессы СРК потенциально опасны, поэтому существует обязательная система защиты персонала и оборудования, не допускающая возможность перехода технологического процесса в аварийную ситуацию. Однако срабатывание системы защиты приводит к длительным простоям оборудования, часто к необходимости его последующего ремонта, что связано с существенными финансовыми потерями.

С учетом вышеприведенного, задача выявления и идентификации возможных нештатных ситуаций для СРК является актуальной [6], однако, большинство разработок систем диагностики СРК предназначалось для работы офф-лайн [7]. В то же время при выявлении нештатных ситуаций на ранних стадиях развивающейся нештатной ситуации, что возможно только при онлайновой диагностике, появляется время на коррекцию параметров технологического процесса, что позволяет не допустить дальнейшего ее развития и вернуть процесс в регламентные рамки.

Таким образом, именно разработка системы диагностики, работающей в реальном времени, даст возможность не только на ранних стадиях выявлять отклонения от нормального характера протекания технологического процесса в СРК, но и определять их причины и выдавать рекомендации для оперативного управления процессом с целью ликвидации этих нарушений. Однако, для построения такой системы диагностики необходимо иметь диагностические модели подсистем СРК.

Следует отметить, что существующие математические описания большинства подсистем СРК либо отсутствуют, либо сложны и неудобны для реализации в режиме реального времени, к тому же, как правило, разработаны для нормального течения процесса. СРК также представляет собой сложный ОУ [5, 8], но для него выполнена и успешно применяется декомпозиция на несколько взаимосвязанных подсистем: подачи мазута; подачи щелока и улавливания золы; питательной воды и парообразования; подачи воздуха; дымовых газов; зеленого и белого щелока; обдувки; дренажей и опорожнения [8]. Декомпозиция СРК даёт возможность для каждой из входящих в её состав подсистем разработать соответствующие системы мониторинга и диагностики состояния технологических процессов в этих подсистемах.

Для разработки ДМ подсистем СРК в свете вышесказанного представляется целесообразным использовать экспертные модели, основанные на опыте экспертов, ведущих эти процессы, и на результатах обработки массивов данных, полученных на реальном ОУ.

Для разработки ДМ подсистем СРК была выбрана иерархическая фреймово-продукционная структура представления знаний в модели [2]. В такой структуре нештатные ситуации группируются по какому-либо признаку. Полученные группы представляются корневыми фреймами на верхнем иерархическом уровне, а дочерние фреймы объединяют правила, характеризующие подгруппы нештатных ситуаций, вызываемых различными причинами, но имеющих общие симптомы. Определение причины нештатной ситуации проводится на базе связывающих нарушения с симптомами продукционных правил, располагаемых также в дочерних фреймах.

II. Методы и результаты исследования

Рассмотрим разработку ДМ СРК на примере подсистемы зеленого и белого щелока и подсистемы обдувки, опорожнения и подачи воды на охлаждение.

Для разработки экспертных моделей выполнен анализ технологического регламента СРК и проведен экспертный опрос, громе того, был учтен и зарубежный опыт [7, 9]. В результате были определены диапазоны изменения технологических параметров процесса, попадающие в зону ответственности системы оперативного управления и диагностики. При этом эксплуатационные пределы устанавливались на уровне 10-15% от/до границ номинального диапазона.

Распознавание возникновения группы нештатных ситуаций для технологических параметров процесса и, следовательно, активации соответствующего корневого фрейма, осуществляется по отклонению значения одного (реже, нескольких) из основных параметров от регламентного диапазона. Для детального выявления конкретной причины, вызвавшей ситуацию, требуется оценить состояние дополнительных параметров.

В результате анализа технологического регламента СРК и выполненного экспертного опроса с учётом декомпозиции СРК [8] для подсистемы зеленого и белого щелока выделены нижеприведенные нештатные ситуации S1–S11:

S1 – повышение уровня воды в расширительном баке;

S2 – понижение уровня воды в расширительном баке;

S3 – повышение расхода воды для охлаждения леток плава;

S4 – понижение расхода воды для охлаждения леток плава;

S5 – повышение уровня зелёного щелока в баке-растворителе плава;

S6 – понижение уровня зелёного щелока в баке-растворителе плава;

S7 – повышение общей щелочности зелёного щелока;

S8 – понижение общей щелочности зелёного щелока;

S9 – повышение плотности зелёного щелока;

S10 – понижение плотности зелёного щелока;

S11 – нарушение работы насосов зелёного щелока;

Приведенные нештатные ситуаций входят в состав ДМ технологического процесса СРК (подсистема зеленого и белого щелока) [10].

Было выполнено тестирование ДМ подсистемы зеленого и белого щелока для приведенных нештатных ситуаций. Рассмотрим реализацию и тестирование ДМ на примере двух нештатных ситуаций S3–S4, связанных с изменением расхода воды для охлаждения леток плава. Формализация экспертной информации ситуаций S3–S4 приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Основной параметр	Нарушение	Доп. параметры	Возможные причины	Рекомендации
Изменение расхода воды для охлаждения леток плава				
Расход воды <1,7л/с	Повышение расхода воды для охлаждения леток плава	Повышение уровня воды в запасном баке > 95%	Увеличение подачи воды из линии подпитки	Уменьшить объем поступающей воды из линии подпитки
		Снижение расхода воды на подпитку <1,5 л/с	Снижение подачи воды из линии подпитки	Увеличить подачу воды из линии подпитки
		Снижение расхода воды на подпитку <1,3 л/с	Значительное снижение подачи воды из линии подпитки	Снизить расход сжигаемого черного щелока
Расход воды >4,5л/с	Понижение расхода воды для охлаждения леток плава	Увеличение расхода воды на подпитку >4,7 л/с	Течь воды в обшивке охлаждения леток плава.	Заглушить аварийную летку, при невозможности аварийно остановить котел
		Отсутствует подача воды для охлаждения леток плава	Повреждения в обшивке летки	Аварийно остановить котел

Согласно таблице, показателями нештатной ситуации S3 – повышение расхода воды для охлаждения леток плава будут:

- повышение уровня воды в запасном баке L1501> 95%;
- снижение расхода воды на подпитку F1517<1,5 л/с;
- снижение расхода воды на подпитку F1517<1,3 л/с;

С учетом вышесказанного рассматриваемую ситуацию можно записать в виде трех правил:

Если F <1,7л/с & L> 95%, то Dg1.1.1 , Rc1.1.1

Если F <1,7 л/с & F<1,5 л/с, то Dg1.1.2 , Rc1.1.2

Если F <1,7 л/с & F<1,3 л/с, то Dg1.1.3 , Rc1.1.3

Перечень причин возникновения нештатных ситуаций (диагнозы Dg) и рекомендаций по их устранению (Rc):

Dg1.1.1 – увеличение подачи воды из линии подпитки;

Dg1.1.2 – снижение подачи воды из линии подпитки;

Dg1.1.3– снижение подачи воды из линии подпитки;

Rc1.1.1 – уменьшить объем поступающей воды из линии подпитки;

Rc1.1.2 – увеличить подачу воды из линии подпитки;

Rc1.1.3 – снизить расход сжигаемого черного щелока.

Разработанные правила были протестированы с помощью имитационного моделирования с использованием экспертной оболочки КАРРА – PCv.2.4.

Для тестирования предложенного алгоритма распознавания причин нештатных ситуаций подсистемы зеленого и белого щелока и подсистемы обдувки, опорожнения и подачи воды на охлаждение СРК №1 использованы статистические данные работы за период 06.02.2020 по 06.03.2020.

Сработало третье правило ситуации (рис. 1).



Рис. 1. Результат работы экспертной системы при возникновении нештатной ситуации S3

Ввиду того, что на ранних стадиях возникновения и развития нештатных ситуаций в СРК существующая система диагностики работает в информационно-советующем режиме у оператора не всегда есть возможность оперативно реагировать на отклонение параметров, например, одновременно может отображаться несколько информационных сообщений для различных подсистем. Разработанная ДМ позволит достаточно точно распознавать нештатные ситуации на ранних стадиях их возникновения и развития и уменьшить время реакции оператора на ситуацию и принятие решения.

III. Заключение

Показано, что СРК является важным и, к тому же, потенциально опасным объектом сульфат-целлюлозного производства, обеспечивающим регенерацию черного щелока. В то же время срабатывание обязательных систем противоаварийной защиты приводит к остановам производства, возможным ремонтам и экономическим потерям. Это делает актуальной разработку систем ранней диагностики нештатных ситуаций, в то же время отсутствие математических описаний большинства подсистем СРК затруднило разработку соответствующих необходимых систем диагностики. Выход был найден в использовании для создания ДМ экспертной информации и обработки массивов данных с СРК.

В результате были разработаны ДМ подсистем СРК в виде иерархической фреймово-продукционной структуры. Разработанные ДМ для подсистемы зеленого и белого щелока протестированы с помощью системы имитационного моделирования на базе экспертной оболочки КАРРА – PCv.2.4. Показано, что ДМ распознают причины возникновения нештатных ситуаций и могут быть использованы в системе диагностики для выявления на ранних стадиях их развития возможных нештатных ситуаций, возникающих в СРК, пока они еще обратимы и управляемы.

Литература

1. *Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N.* A review of process fault detection and diagnosis. Quantitative model-based methods // Computers and Chemical Engineering. – 2003. – Vol. 27. – P. 293-346.
2. *Русинов Л.А., Рудакова И.В, Куркина В.В.* Мониторинг и диагностика состояния технологических процессов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2010. – № 7 (33). – С. 80-87. – EDN MSZKRR.
3. *Ковалев Д.А., Кондрашикова Г.А., Русинов Л.А.* К вопросу применения диагностических моделей для систем автоматического управления объектами целлюлозно-бумажной промышленности // Энергетика, экология и бизнес: Материалы ежегодной III Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей. В 3-х ч., Санкт-Петербург, 31 мая 2019 года / Под общ. ред. Т.Ю. Коротковой. – СПб.: Изограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 2019. – С. 86-89. – EDN WODVNM.
4. *Русинов Л.А., Куркина В.В.* Мониторинг и диагностика состояния потенциально опасных технологических процессов // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2018. – Т. 1. – С. 11-19. – EDN EXOZLP.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 3. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП. – СПб.: Политехника, 2008. – 621 с. – ISBN: 978-5-7325-0707-2.

6. *Singh A., Sharma V., Mittal S. etc.* An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers // International Journal of Industrial Chemistry. – 2018. – No. 9. – P. 1-15. – DOI: org/10.1007/s40090-017-0133-0.
7. Continuous development of recovery boiler technology – 50 year of cooperation in Finland / Ed. Vakkilainen E., Lampinen P., Nieminen M. // 50th anniversary international recover boiler conference Proceedings. Tampere, 2014, june 11. – 136 p.
8. *Ковалев Д.А.* Анализ возможных нарушений технологических процессов в содорегенерационном котле // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 56. – С. 108-111. – DOI: 10.36807/1998-9849-2020-56-82-108-111. – EDN WYMCWM.
9. *Tran H., Villarroel R.* Challenges in black liquor recovery in modern kraft pulp mills // The 5th International Conference on Eucalyptus Pulp Porto Seguro, Brazil, 2011, May 12. – 50 p.
10. *Kovalev D.A., Rusinov L.A.* Increase in environmental safety of recovery boiler // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IV International scientific and practical conference "Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection" (APEC-IV-2021), Tajikistan, 24–26 ноября 2021 года. – Tajikistan: IOP Publishing Ltd, 2022. – P.012068. – DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012068. – EDN AOGERP.