

Степанец А. В.,  
Коропова Л. А.

## АУДИТ КАЧЕСТВА РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ БАРАБАННЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

*Разработана комплексная математическая модель динамики барабанного парового котла с использованием системы автоматического управления. Модель дополнена основными контурами регулирования с типовыми алгоритмами управления. Определены основные взаимосвязи между контурами регулирования и исследована динамика их взаимодействия. Приведены результаты моделирования основных технологических параметров в виде переходных процессов.*

**Ключевые слова:** паровой котел, комплексная математическая модель, система автоматического управления.

### 1. Введение

Качество разрабатываемых систем автоматического управления во многом зависит от полноценности используемых на этапе функционального проектирования математических моделей технологических объектов управления. Парогенерирующие тепловые машины являются технологическим базисом многих промышленных объектов. Эта роль предполагает пристальное внимание со стороны, как технологов, так и специалистов промышленной автоматизации, потому что современный технологический прогресс требует обеспечения оптимальности работы оборудования, снижения энергопотребления, увеличения надежности, экономичности, экологичности при росте КПД. Паровой котел как объект регулирования представляет собой сложную динамическую систему с большим количеством входных и выходных взаимосвязанных величин [1, 2], поэтому, исследуя его, в большинстве случаев проводят декомпозицию на отдельные участки регулирования [3]. При этом автоматически исключается влияние других контуров на исследуемый, что усложняет задачу практического применения новых разработанных алгоритмов управления из-за несоответствия идеализированных представлений о динамике объекта реальному техническому комплексу. Для исследования синтезируемых алгоритмов и систем управления предлагается использовать комплексную математическую модель динамики объекта, что позволит учесть взаимовлияние контуров регулирования через объект и приблизить поведение тестируемой системы к промышленным реалиям. В то же время исследование этих аспектов и их учет при разработке алгоритмов управления может, как повысить эффективность подконтрольной системы, так и удешевить стоимость внедрения за счет имитационного моделирования в противовес дорогостоящим натурным экспериментам.

Исходя из вышесказанного, разработка комплексной модели парового котла и приведение ее к виду, доступному для использования в момент проектирования системы автоматического управления, является важной научно-технической задачей.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопрос построения математической модели для отдельных контуров регулирования является актуальным не только для барабанных паровых котлов, а и для всех технологических объектов подлежащих регулированию [4]. В работе показано, что использование такого концептуального подхода к построению модели позволит сэкономить как материальные средства, так и повысить эффективность использования разработок.

Анализ литературных источников позволил выделить несколько распространенных способов решения этой задачи.

В работе [5] показан классический подход к решению подобной задачи, основанный на описании теплового баланса для рассматриваемого контура и получения системы дифференциальных уравнений, которая устанавливает связь между указанными параметрами. К недостаткам такого метода можно отнести сложность получения математических взаимосвязей для сложных динамических объектов.

Еще одним распространенным способом решения [6] является обработка реальных данных, полученных в ходе эксперимента, и получение зависимостей в виде передаточных функций (активный эксперимент). Но так как исследуемый объект является достаточно сложным и, главное, небезопасным для проведения опытов в режиме реального времени, большого распространения он не получил.

Оба метода достаточно точно отображают динамику исследуемого контура.

Менее используемым способом является пассивный эксперимент [7], основанный на использовании внешних проявлений свойств объекта, фиксируемых во время эксплуатации объекта.

Целесообразность использования активного экспериментального метода для построения комплексной математической модели подтверждается результатами исследований регулируемой системы и характеризуется существенным улучшением показателей качества еще на стадии проектирования.

Но недостаточность экспериментальных данных, описывающих влияние возмущающих воздействий на регулируемые технологические параметры, обуславливают необходимость проведения дополнительных исследований.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — барабанный паровой котел.

Целью данной работы является улучшение работы системы управления котлоагрегатов путем разработки комплексной математической модели динамики и, в дальнейшем, тестирование полученных результатов для совершенствования алгоритмов регулирования контурами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать динамические свойства участков трактов котлоагрегата как объектов управления;
- 2) проанализировать существующие решения по управлению отдельными контурами;
- 3) определить требования по разработанной модели;
- 4) описать взаимозависимости с помощью математического аппарата;
- 5) разработать программного обеспечения на базе микропроцессорной техники.

### 4. Математическая модель динамики котла ДКВР 10-13

Нынешний подход к разработке современных концепций автоматического управления связан с рассмотрением объекта управления в виде упрощенной динамической системы с ограниченным числом входов и выходов [8–11]. Решение задач оптимального управления в соответствии с заданными критериями качества проводятся с помощью математических моделей, которые не всегда адекватно описывают поведение объекта управления в ограниченном наборе возмущающих воздействий, поэтому и не являются достаточно эффективными.

Для рассмотрения предлагается упрощенная комплексная модель, которая позволяет провести расчетную и стендовую отладку систем автоматического регулирования (САР) как в штатных режимах эксплуатации, так и в аварий-

ных ситуациях. А это то, что на реальных объектах либо невозможно сделать, либо понесет за собой большие финансовые затраты на эксперименты. Несмотря на сложность достижения полного соответствия модели реальному объекту из-за огромного числа взаимовлияющих факторов, модель все же позволяет отследить поведение комплекса контуров регулирования и адекватность их реакции на физические процессы в котле.

Как пример инструментария тестирования алгоритмов управления рассмотрим разработанную для котла ДКВР 10-13 математическую модель динамики (рис. 1). Разработана методика имитационного моделирования поведения котла с учетом влияния как управляющих воздействий со стороны алгоритмов управления, так и неконтролируемых, но имитируемых внешних возмущений. Для выбранного котла в модели реализованы основные контуры регулирования [1]: тепловой нагрузки, разрежения в топке, экономичности горения, уровня воды в барабане, непрерывной продувки для обеспечения допустимого солевого содержания в котловой воде, температуры первичного пара. Технически основой моделирования выступило инструментальное средство для моделирования динамических систем SIMULINK, входящее в состав пакета MATLAB.

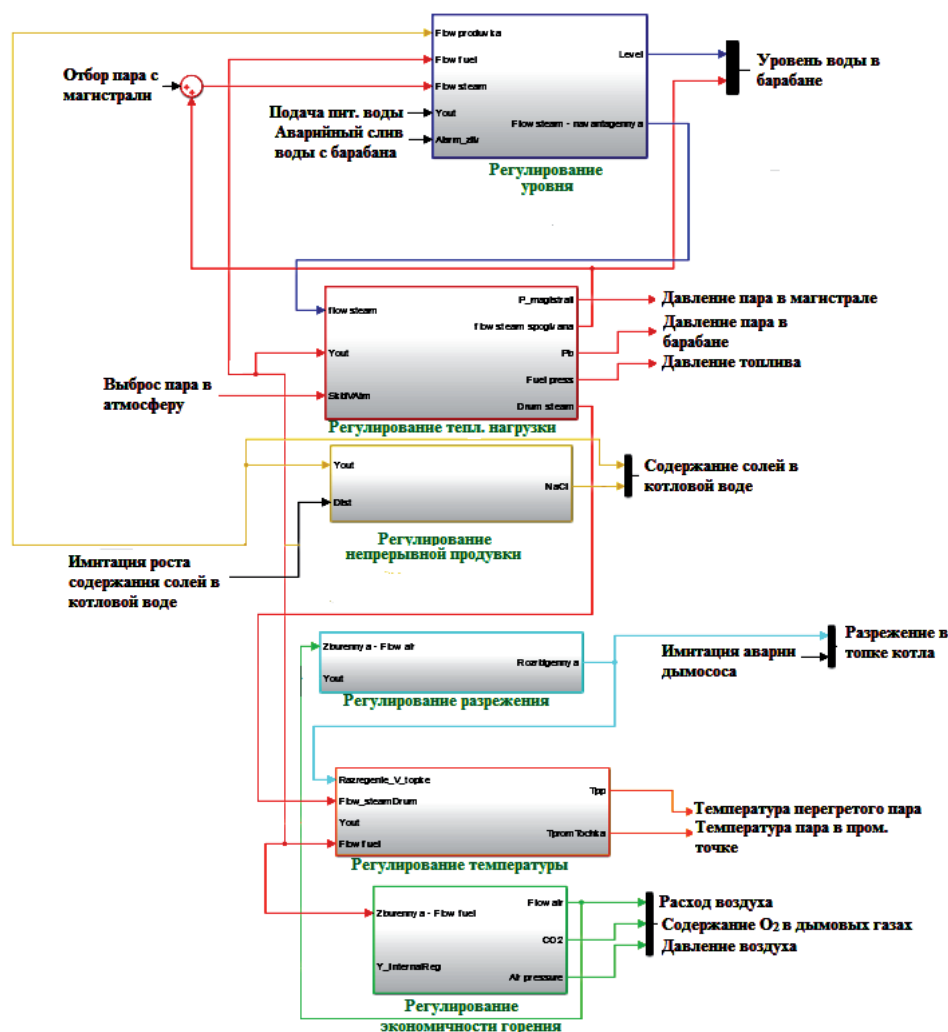


Рис. 1. Математическая модель динамики котла ДКВР 10-13

В модели используются подсистемы (регулирование уровня, тепловой нагрузки, содержания солей в котловой воде, температуры перегрева пара, содержания кислорода в дымовых газах, регулирования разрежения в топке котла), в которых «спрятаны» собственно математические модели контуров регулирования. Для вывода текущих значений на экран модель дополняется блоками Display. Блоки out (находятся внутри подсистем) используются для сохранения результатов моделирования и возможности обработки полученных данных после завершения процесса моделирования. Обмен данными между моделью и контроллером, в котором реализованы алгоритмы регулирования и защит, происходит по технологии OPC с помощью блоков считывания и записи данных.

В таком виде модель позволяет исследовать новые алгоритмы управления и сравнивать с уже существующими, типовыми [3], одновременно наблюдая поведение объекта в целом. Проектирование САР включает исследование взаимовлияния всех контуров регулирования, и сводят модель к определенному набору звеньев, повторяющих динамику отдельных участков технологического процесса без отрыва от других компонентов САР. При сложном объекте управления и взаимосвязанности работы различных подсистем, а также при наличии многочисленных особенностей протекания технологического процесса, в котором присутствуют процессы различной физической природы, это позволяет исключить влияние человека-оператора и правильно сформировать алгоритмы управления и регулирования. Поэтому алгоритмическую часть АСУ ТП выгоднее проверить сначала на модели объекта, прежде чем приступить к натурным испытаниям.

Синтез пригодных к использованию систем управления осложняется изменением динамических характеристик отдельных элементов котельных агрегатов в зависимости от нагрузки и других факторов, а также существенным транспортным запаздыванием, характерным для контуров управления теплоэнергетическими процессами. Таким образом, для обеспечения нужного качества управления параметры регулятора надо менять в значительных диапазонах. Для проведения анализа динамических свойств по перечисленным каналам разгонные кривые контуров аппроксимированы инерционными звеньями первого порядка с запаздыванием. В результате аппроксимации были получены передаточные функции  $W(s)$ , показанные в табл. 1.

Таблица 1

Передаточные функции каналов регулирования

№	Канал регулирования	Передаточная функция
1	Производительность дымососа — разрежения в топке котла	$W(s) = \frac{20,6s + 2,78}{0,0566s^2 + 1,67s + 1}$
2	Расход воздуха — разрежения в топке котла	$W(s) = \frac{80,3s + 1,080}{0,0566s^2 + 1,67s + 1}$
3	Производительность вентилятора — расход воздуха	$W(s) = \frac{0,00455s + 0,224}{0,000347s^2 + 0,748s + 1}$
4	Производительность вентилятора — давление воздуха	$W(s) = \frac{0,5}{16s + 1}$
5	Расход воздуха — содержание $O_2$	$W(s) = \frac{2,74s + 0,224}{56s^2 + 16s + 1}$

Окончание табл. 1

№	Канал регулирования	Передаточная функция
6	Расход топлива — содержание $O_2$	$W(s) = \frac{-39,8}{56s^2 + 16s + 1}$
7	Подача питательной воды — уровень в барабане	$W(s) = \frac{0,022}{s} e^{-20s}$
8	Расход топлива — уровень в барабане	$W(s) = \frac{0,015}{60s + 1} + \frac{-1}{100s + 1}$
9	Расход пары — уровень в барабане	$W(s) = \frac{0,26}{s} e^{-70s}$
10	Количество сгенерированной пары — давление в магистрали	$W(s) = \frac{1}{32s + 1}$
11	Количество сгенерированной пары — расход потребляемой пары	$W(s) = \frac{0,8s}{28,25s + 1} \cdot \frac{1}{43,67s + 1}$
12	Расход пара — давление в магистрали	$W(s) = \frac{30,03s + 1}{28,25s + 1} \cdot \frac{40s + 1}{43,67s + 1}$
13	Расход пара — расход потребляемой пары	$W(s) = 0,0195 \cdot \frac{41s}{41s + 1}$
14	Расход топлива — давление топлива	$W(s) = \frac{0,2}{20s + 1}$
15	Расход топлива — тепловосприятие топки	$W(s) = \frac{0,5}{10s + 1}$
16	Расход топлива — количество сгенерированной пары	$W(s) = \frac{0,6}{20s + 1}$

## 5. Программно-аппаратное обеспечение

Ключевым преимуществом модели является возможность ее реализации на промышленных и/или лабораторных программно-технических комплексах (ПТК) с физическими входами-выходами.

Модель осуществляет вычислительные операции для расчета значений технологических параметров. Далее эти значения передаются в SCADA-систему, которая обеспечивает вывод информации на экран оператора стенда. В свою очередь ПЛК в соответствии с заложенными алгоритмами формирует управляющие воздействия на объект, и так же передает данные на верхний уровень.

Математический аппарат модели позволяет имитировать ситуацию, которая происходит во время наступления аварии на объекте.

Они имитируют поведение реальных датчиков и воспринимают реальные управляющие команды от программируемого логического контроллера (ПЛК), который далее устанавливается в АСУТП котла. Модель и алгоритмы моделируются не в пределах одного компьютера, а уже в составе готового ПТК, с реальной аппаратной платформой. Таким образом, можно достичь уже отладки не только алгоритмической части АСУ, но и ее «железа», а также диспетчерского уровня, в ситуациях различного рода приближенных к действительности.

Для интерактивного взаимодействия исследователя и модели используется встроенный в контроллер веб-сервер (рис. 2). Пользователь имитационного стенда может иметь удаленный доступ к текущим данным,

если он имеет подключение к сети, в которую подключен контроллер.

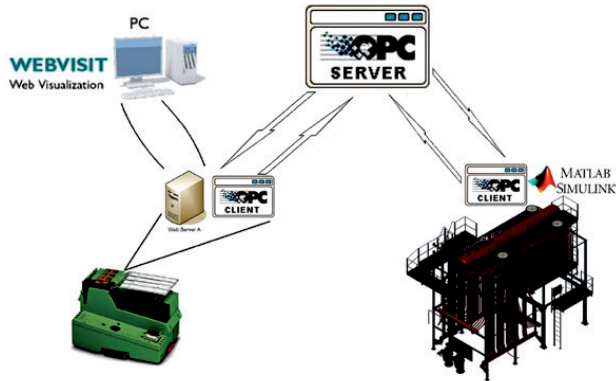


Рис. 2. Структурная схема обмена данными

Физическая реализация модели возложена на промышленный программируемый логический контроллер

модульного типа Phoenix Contact ILC [4]. Это позволяет привязать необходимое количество логических входов/выходов модели к физическим унифицированным интерфейсам контроллера, а, следовательно, и к внешнему аппаратному обеспечению, в котором были реализованы алгоритмы управления. В ПО контроллера были реализованные типовые законы управления контуров регулирования [1].

### 6. Результаты имитационного моделирования

Для проверки функциональности разработанной системы имитационного моделирования с использованием реального оборудования на рис. 3 приведены результаты в виде переходных процессов 6 основных участков регулирования и влияние на них основных возмущений.

Из рис. 3 видно, что приведенные результаты не превышают желаемых показателей качества регулирования, необходимых для поддержания регулируемых параметров с заданной точностью.

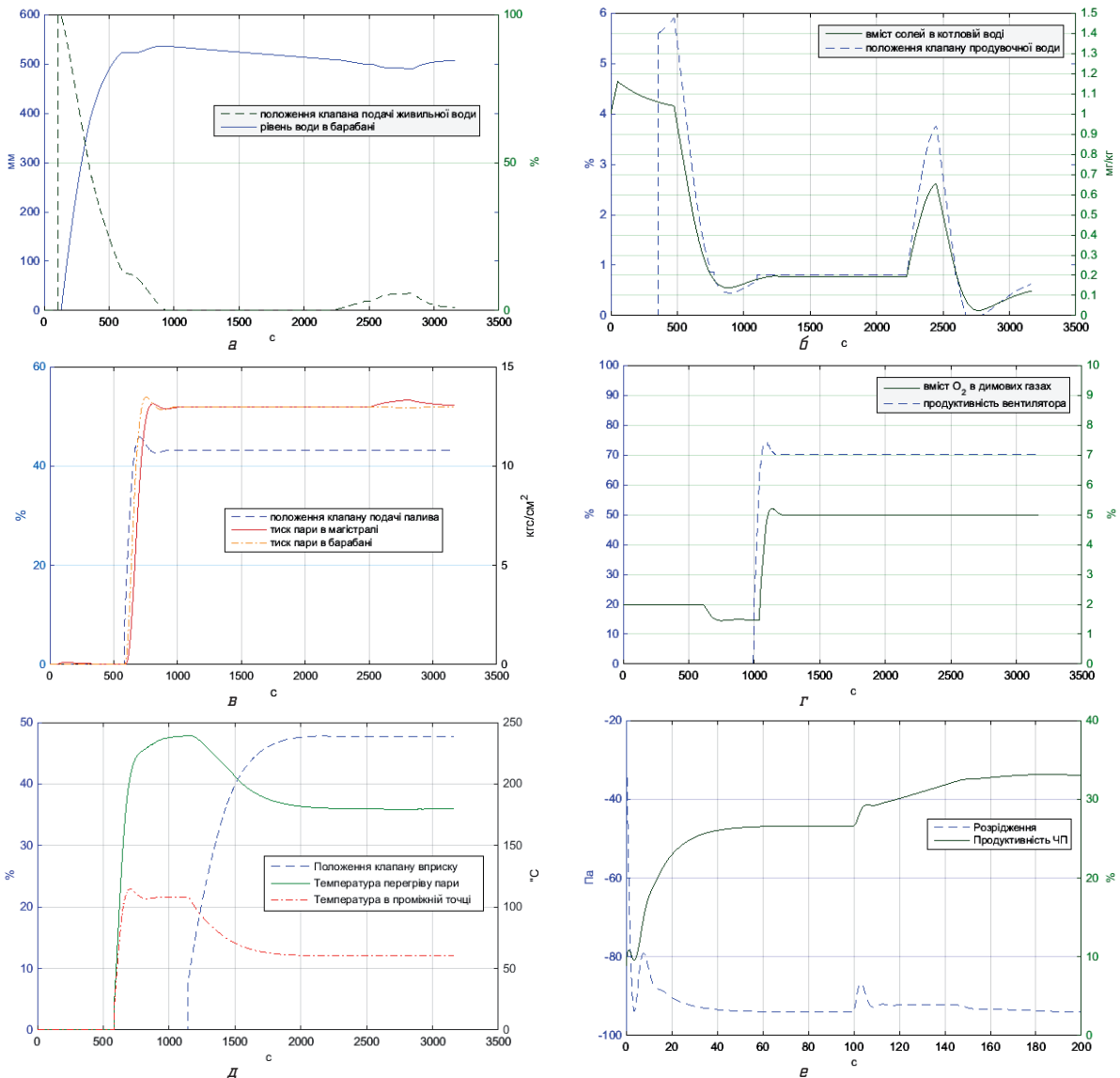


Рис. 3. Переходные процессы регулирования основных технологических параметров: а — уровень воды в барабане котла; б — содержание солей в котловой воде; в — давление пара в барабане; г — концентрация кислорода в дымовых газах; д — температура перегретого пара на выходе с паропровода; е — разрежение в топке котла

## 7. Обсуждение результатов полученных исследований на основании комплексной математической модели котла ДКВР 10-13

Сложность построения общей структуры с помощью математических взаимозависимостей между входными и выходными параметрами, заключается в получении передаточных функций каналов регулирования, описываемых звеньями разных порядков. Для решения данной проблемы использовались данные полученные на реальном технологическом объекте. Следует также отметить, что полученные разгонные характеристики были аппроксимированы передаточными функциями 1-го и 2-го порядка.

Полученные в результате взаимозависимые системы моделирования отдельных контуров позволили настроить регуляторы таким образом, чтобы общая система была устойчивой и обеспечивала заданные показатели качества.

В отличие от результатов исследований, опубликованных в [6], полученные данные позволяют утверждать следующее:

- физическая реализация моделирования с помощью аппаратного комплекса незначительно ухудшает полученные результаты, что еще раз доказывает целесообразность проведения аудита качества на подобных комплексах;
- диагностика некорректности настроек параметров в методах управления на этапе проведения теоретических исследований позволяет усовершенствовать разработанные алгоритмы на стадии проектирования системы, что по умолчанию повышает рентабельность благодаря удешевлению этапа разработки системы, а также повышению эксплуатационных качеств системы управления.

## 8. Выводы

Выполненные исследования динамики барабанного парового котла подтвердили сложность регулирования всей целостной системы, что и послужило импульсом для развития современного, принципиально отличного от предшественников подхода, который также в свою очередь обеспечит выполнение необходимых требований технического регламента.

В работе описано место комплексной математической модели объекта управления в проектировании высокоэффективных АСУТП энергетической отрасли. На примере модели динамики барабанного котла серии ДКВР показаны преимущества использования комплексной модели для тестирования, отладки и оптимизации алгоритмов управления на этапе стендовых испытаний промышленного ПТК.

Результаты исследования модели свидетельствуют о возможности создания настраиваемой нелинейной динамической имитационной модели барабанного парового котла, которую с соответствующими программно-аппаратными средствами ПТК возможно использовать в АСУТП для целей управления и диагностирования.

## Литература

1. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления [Текст]: учебник для вузов / В. Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — С. 7–14.
2. Демченко, В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС [Текст] / В. А. Демченко. — О.: Астропринт, 2001. — 305 с.
3. Серов, Е. П. Динамика парогенераторов [Текст] / Е. П. Серов, Б. П. Корольков. — М.: Энергоиздат, 1981. — 408 с.
4. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления [Текст] / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 32 с.
5. Тодорцев, Ю. К. Модели элементов установки теплоснабжения как объекта автоматизации [Текст] / Ю. К. Тодорцев, К. В. Беглов, И. Н. Максименко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2005. — № 2(16). — С. 27–31.
6. Автоматика-2014 [Текст]: материалы 21-й Международной конференции с автоматического управления, 23–27 сентября 2014, г. Киев / под ред. М. Ю. Ильченко. — К.: Изд-во НТУУ «КПИ» ВПИ ВПК «Политехника», 2014. — 58 с.
7. Åström, K. J. Drum-boiler dynamics [Text] / K. J. Åström, R. D. Bell // Automatica. — 2000. — Vol. 36, № 3. — P. 363–378. doi:10.1016/s0005-1098(99)00171-5
8. Плетнёв, Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций [Текст] / Г. П. Плетнёв. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 368 с.
9. Клюев, А. С. Настройка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / А. С. Клюев, А. Г. Товарнов. — М.: Энергия, 1970. — 280 с.
10. Control Technology, I/O Systems and Automation Infrastructure 2013/2014 [Electronic resource]. — Germany: Phoenix Contact GmbH, 2013. — № 8. — 560 p. — Available at: \www/URL: [https://www.phoenixcontact.com/assets/interactive\\_ed/local\\_ae/modules/0000905/page305.html](https://www.phoenixcontact.com/assets/interactive_ed/local_ae/modules/0000905/page305.html)
11. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules [Text] / A. O'Dwyer. — Ed. 2. — London: Imperial College Press, 2006. — 564 p. doi:10.1142/9781860949104

## АУДИТ ЯКОСТІ РОБОТИ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ БАРАБАНИМ ПАРОВИМ КОТЛОМ НА СТАДІЇ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розроблено комплексну математичну модель динаміки барабанного парового котла для тестування якості роботи алгоритмів керування. Модель доповнено основними контурами регулювання з типовими алгоритмами керування. Визначено основні взаємозв'язки між контурами регулювання та досліджено динаміку їх взаємодії. Наведено результати моделювання основних технологічних параметрів у вигляді перехідних процесів.

**Ключові слова:** паровий котел, комплексна математична модель, система автоматичного керування.

*Степанець Александр Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: [stepanets.av@gmail.com](mailto:stepanets.av@gmail.com).*

*Коропова Леся Александровна, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: [lesunia007@gmail.com](mailto:lesunia007@gmail.com).*

*Степанець Олександр Васильович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Коропова Леся Олександрівна, кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна.*

*Stepanets Oleksandr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: [stepanets.av@gmail.com](mailto:stepanets.av@gmail.com).  
Koropova Lesia, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: [lesunia007@gmail.com](mailto:lesunia007@gmail.com)*