

УДК 681.51

С.Р. Шакиров<sup>1</sup>, А.Г. Квашнин<sup>2</sup>, А.В. Писарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛИ В НЕЙРО-НЕЧЕТКОМ РЕГУЛЯТОРЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

В работе описан предлагаемый алгоритм идентификации динамических характеристик объекта регулирования для определения инверсной модели нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов. Идентификация выполняется в двух режимах работы регулятора: штатном и при отклонениях температуры дымовых газов в камере сжигания установки от текущего задания на величину, превышающую уставку. Предложен алгоритм, позволяющий сократить время идентификации. Приведены результаты моделирования работы алгоритма идентификации динамических характеристик объекта регулирования.

**Ключевые слова:** идентификация динамических характеристик объекта регулирования; регулятор тепловой нагрузки; нестационарность динамических характеристик; нейро-нечеткий регулятор; инверсная модель; установка переработки отходов.

S.R. Shakirov<sup>1</sup>, A.G. Kvashnin<sup>2</sup>, A.V. Pisarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies,  
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University (Russia, Novosibirsk) (NSU), Novosibirsk, 630090,  
Russian Federation

## AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE INVERSE MODEL IN THE NEURO-FUZZY CONTROLLER OF THE HEAT LOAD OF AN ORGANIC WASTE PROCESSING PLANT

The paper describes the proposed algorithm for identifying the dynamic characteristics of the controlled object for determining the inverse model of the neuro-fuzzy controller of the heat load of an organic waste processing plant. Identification is performed in two modes of operation of the controller: normal and when the temperature of flue gases in the combustion chamber of the plant deviates greater than the specified value. We propose an algorithm to reduce the identification time. The article presents the results of modeling the algorithm for identifying the dynamic characteristics of the controlled object.

**Keywords:** identification of dynamic characteristics of the controlled object; controller of the heat load; nonstationary dynamic characteristics; neuro-fuzzy controller; inverse mode; organic waste processing plant.

**Введение.** В работах [1,2,3,4] представлены результаты по разработке и математическому моделированию работы нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки утилизации органических отходов. Функцией регулятора

тепловой нагрузки является стабилизация температуры дымовых газов в камере сжигания установки во всех режимах работы (пиролиз, газификация, сжигание) и во всем диапазоне нагрузок [1]. При моделировании динамических характеристик объекта регулирования по каналу «расход топлива – температура дымовых газов в камере сжигания» определено, что они являются нестационарными и зависят от физических характеристик и химического состава сжигаемого топлива и в большинстве случаев различны для разных видов топлива. Физические характеристики и химический состав сжигаемого топлива могут изменяться в процессе работы установки также и для одного вида топлива. Эти изменения в большинстве случаев являются неконтролируемыми. Из-за неопределенности динамических характеристик объекта регулирования при работе установки необходимо выполнять идентификацию математической модели объекта регулирования в режиме реального времени. В данной работе представлены алгоритмы идентификации динамических характеристик объекта регулирования автоматизированной системы регулирования (АСР) тепловой нагрузки, которые выполняются в двух режимах работы установки: при отклонениях температуры дымовых газов и штатном.

**Описание АСР тепловой нагрузки установки и объекта регулирования.** В состав корректирующего устройства регулятора тепловой нагрузки системы управления установки переработки органических отходов входит инверсная модель объекта регулирования [4]. В работах [1-4] определена нестационарность динамических характеристик объекта регулирования, что обуславливает необходимость при работе регулятора тепловой нагрузки установки в режиме реального времени выполнять идентификацию математической модели объекта регулирования.

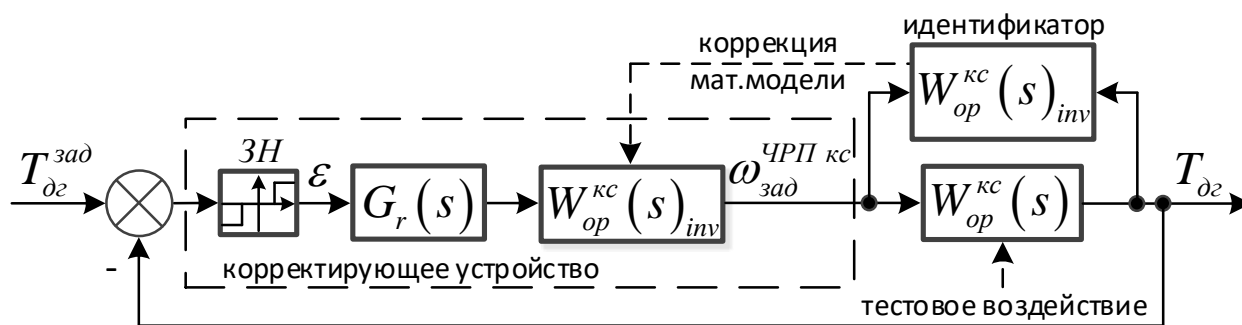


Рисунок 1 – Структурная схема АСР тепловой нагрузки установки.

$W_{op}^{kc}(s)$  – объект регулирования – камера сжигания по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя – температура дымовых газов в камере сжигания»;  $W_{op}^{kc}(s)_{inv}$  – инверсная нечеткая модель камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя – температура дымовых газов в камере сжигания»;  $G_r(s)$  – передаточная функция пре-регулятора;  $T_{\Delta g}^{зад}$ , °C – задание регулятору тепловой нагрузки установки;  $\epsilon$ , °C –

рассогласование на входе регулятора тепловой нагрузки;  $\omega_{зад}^{ЧРП\text{ кс}}$ ,  $1/c$  – задание частоты вращения ЧРП шнекового питателя камеры сжигания;  $ЗН$  – зона нечувствительности корректирующего устройства.

**Идентификация при отклонениях температуры дымовых газов.** При отклонении температуры дымовых газов в камере сжигания из-за неопределенности динамических характеристик объекта регулирования определение необходимой величины тестового воздействия вызывает сложности: при малой величине тестового воздействия величина отклика объекта регулирования может оказаться недостаточной для определения динамических характеристик, большая величина тестового воздействия может привести к аварийному повышению температуры дымовых газов или её недопустимому снижению [5]. Тестовое воздействие оказывает влияние на технологический процесс, что может быть недопустимым по условиям его протекания. Также процесс идентификации может быть длительным и на это время вводятся ограничения в работе установки.

Алгоритм формирования выборки данных для идентификации динамических характеристик объекта регулирования без использования тестовых воздействий на объект регулирования состоит из 5 шагов:

1. При отклонении температуры дымовых газов в камере сжигания от текущего задания на величину, превышающую уставку, происходит отключение регулятора, при этом обороты шнекового питателя не изменяются. В случае повышения температуры выше заданной уставки отключается ещё и шнековый питатель камеры сжигания и подача топлива в камеру сжигания прекращается. При этом установка остается в работе, и другие технологические процессы не прерываются (например, сушка) [4].

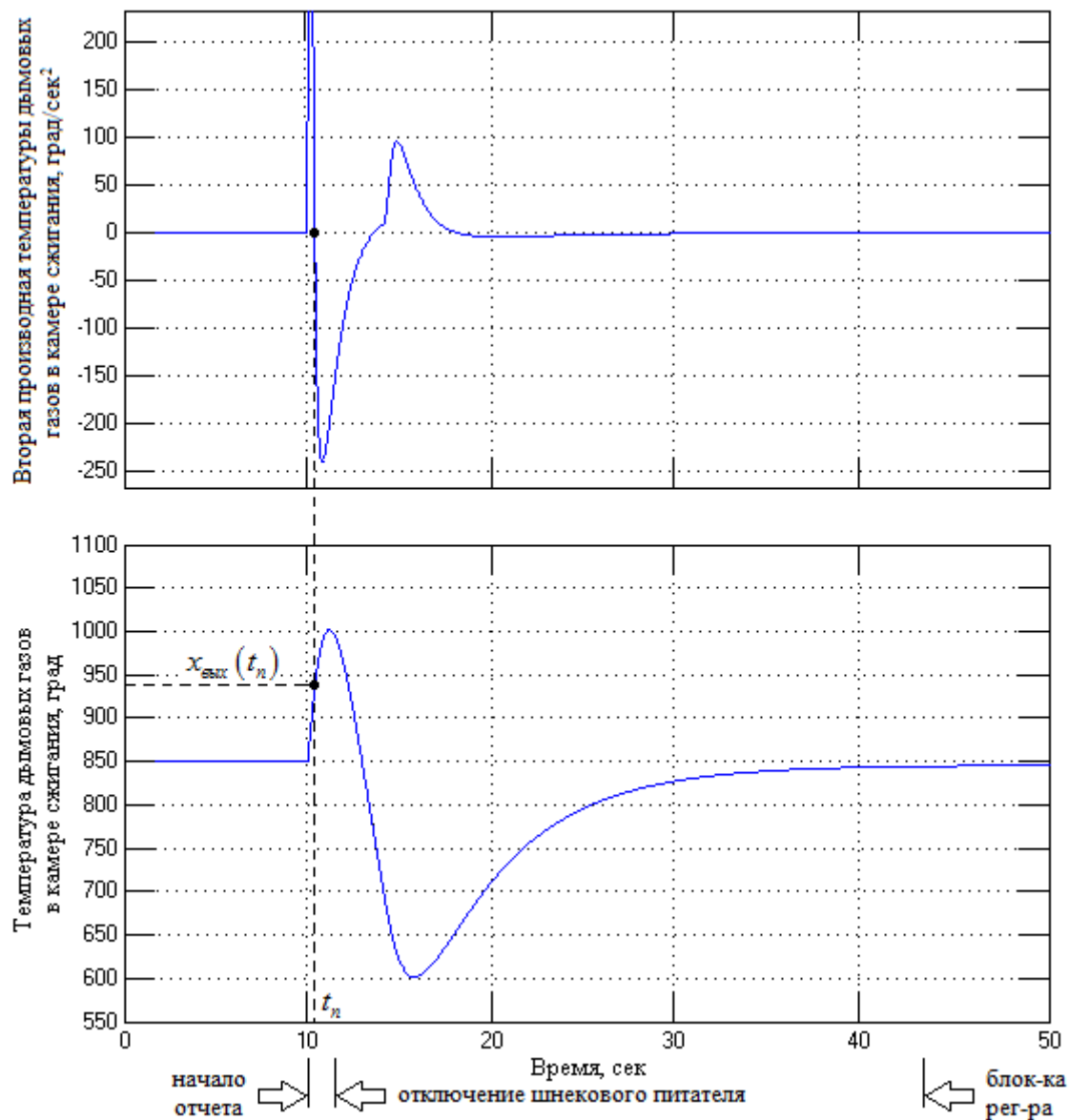


Рисунок 2 – Идентификация в режимах отклонения температуры дымовых газов.

$x_{\text{вых}}(t_n)$ , °C - величина переходной функции в точке перегиба (температура дымовых газов в камере сжигания);  $t_n$ , с – время точки перегиба. На рис. 2 приведен переходный процесс в АСР тепловой нагрузки (нижний график) для случая, когда происходит повышение температуры дымовых газов в камере сжигания выше заданной уставки. Параметрическое возмущение (изменение динамических характеристик объекта регулирования – температуры дымовых газов в камере сжигания с минимальных на максимальные) формируется в момент времени 10 сек. Т.к. при этом режиме отключен шнековый питатель (в момент времени 11 сек, т.е. через 1 сек) и если бы для выполнения идентификации необходимо было бы дождаться установившегося состояния переходной характеристики, то температура дымовых газов в камере сжигания стала бы равной температуре окружающей среды. Т.е. это соответствовало бы отключенному состоянию установки. По этой причине определялась координата точки перегиба (верхний график рис. 2 – в точке, где вторая производная

температуры дымовых газов в камере сжигания равна нулю), а затем параметры математической модели объекта регулирования. Регулятор включился в работу в момент времени 43 сек, т.е. через 33 сек после изменения динамических характеристик объекта регулирования.

2. Определяются координаты точки перегиба (время, величина температуры дымовых газов) переходной характеристики объекта регулирования. Вторая производная температуры дымовых газов в этой точке равна нулю [6].

3. Расчетным методом по координатам точки перегиба достраивается переходная характеристика объекта регулирования по соотношениям, связывающим параметры переходной характеристики (постоянные времени, коэффициент усиления) с координатами точки перегиба [7]. За исходное принимается либо время начала последнего изменения частоты вращения шнекового питателя камеры сжигания перед отключением регулятора, либо, в случае повышения температуры выше заданной уставки, полное отключение шнекового питателя. Эти изменения частоты вращения шнекового питателя принимаются за тестовые воздействия, что и позволяет исключить необходимость их специальной подачи. Определение параметров переходной характеристики предложенным методом позволяет не дожидаться завершения реакции объекта регулирования на изменение частоты вращения шнекового питателя [5].

4. Выполняется коррекция продукционных правил нечеткой модели объекта регулирования [8].

5. Регулятор включается в работу после завершения коррекции продукционных правил и передачи полученной инверсной модели объекта регулирования (рис. 1) в корректирующее устройство [8].

**Идентификация в штатных режимах работы установки.** Идентификация динамических характеристик объекта регулирования в штатном режиме работы установки выполняется аналогично п. 3 алгоритма для режимов отклонения температуры дымовых газов, но с использованием тестовых воздействий на объект регулирования.

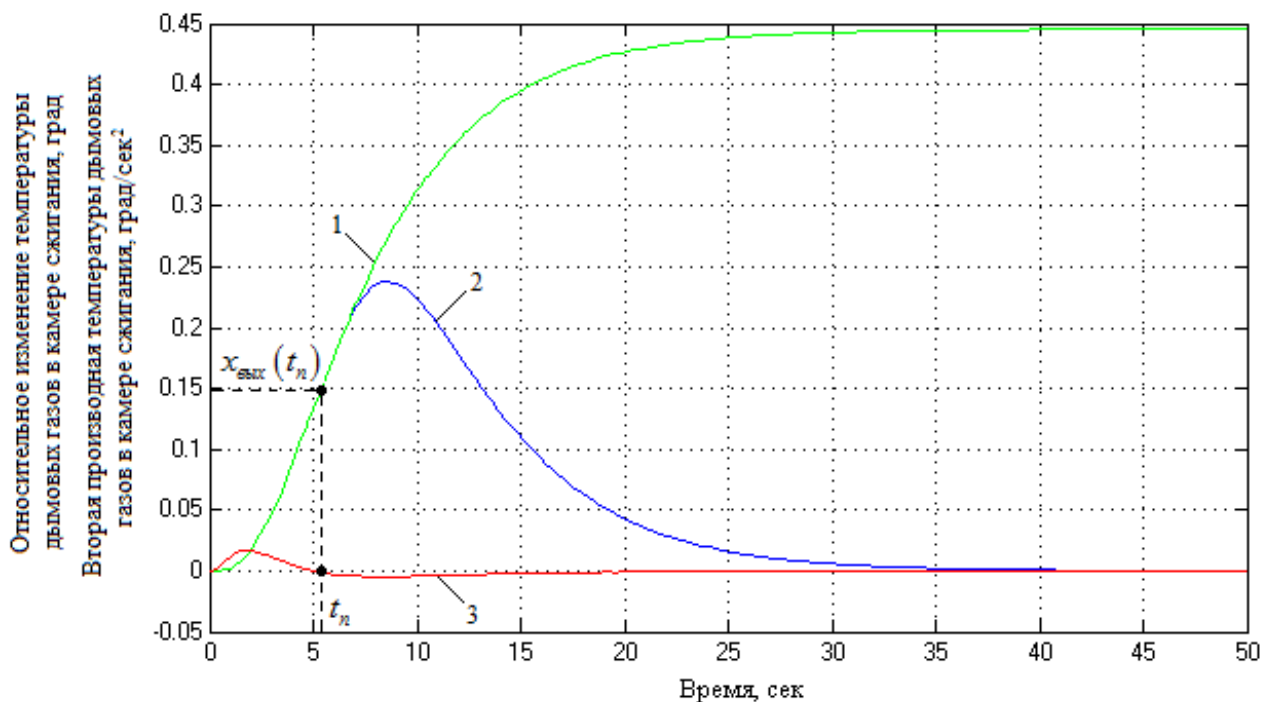


Рисунок 3 – Построение переходной характеристики объекта регулирования в штатном режиме работы установки и при отклонениях температуры дымовых газов в камере сжигания.

- 1 – переходная характеристика объекта регулирования (температура дымовых газов в камере сжигания);
- 2 – импульсная переходная характеристика объекта регулирования;
- 3 – вторая производная температуры дымовых газов в камере сжигания.

Кривая 1 на рис. 3 представляет собой переходную характеристику объекта регулирования и по ней определяется его математическая модель.

Переходная характеристика объекта регулирования, приведенная на рис. 3, может быть получена 2 способами:

- подачей ступенчатого воздействия длительностью 50 сек на вход объекта регулирования;
- подачей импульса длительностью 6 сек на вход объекта регулирования – кривая 2 на рис. 3.

Длительность импульса определяется необходимостью прохождения импульсной переходной характеристикой объекта регулирования - кривая 2 (рис. 3) точки перегиба. Затем по координате точки перегиба определяются параметры динамических характеристик объекта регулирования [6] - кривая 1 (рис. 3). Координата точки перегиба по оси времени определяется при равенстве нулю второй производной выходного сигнала объекта регулирования – кривая 3 (рис. 3).

Это позволяет снизить величину отклонения регулируемого параметра от задания и длительность подаваемого тестового воздействия, т.к. длительность импульса меньше длительности ступенчатого воздействия, необходимого для получения переходной характеристики объекта регулирования.

При идентификации в штатных режимах работы установки на объект регулирования подается тестовое воздействие. Т.к. динамические характеристики известны, то величина тестового воздействия может быть определена. Величина воздействия на объект регулирования определяется так, чтобы отклик объекта регулирования не превышал зону нечувствительности регулятора. Для кривых 1,2 на рис. 3 изменение частоты вращения шнекового питателя (воздействие на объект регулирования) равнялось 0,02 рад/с.

**Выводы.** Разработанные алгоритмы идентификации объекта регулирования позволяют:

1. В штатном режиме работы установки сократить амплитуду и длительность тестового воздействия. Следствием этого является снижение амплитуды отклика объекта регулирования при идентификации.

2. Сократить время процесса идентификации при отклонениях температуры дымовых газов в камере сжигания и стабилизировать процесс горения.

### Список литературы

1. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка автоматического регулятора тепловой нагрузки установки утилизации биоотходов // XVIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Иркутск 21–25 августа 2017 г. – С. 50.

2. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Математическое моделирование работы нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 36.

3. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Алгоритм формирования выборки данных для идентификации математической модели объекта регулирования нейро-нечеткого регулятора // Тезисы XX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 28 октября – 1 ноября 2019 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 73-74.

4. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Синтез нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 9. – С. 54-62.

5. Новиков С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования. Ч. 1. Методы определения оптимальных параметров настроек регулирующих устройств. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 108 с.

6. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1972. 376 с.

7. Antonio Visioli. Practical PID Control (Advances in industrial control). – Springer-Verlag London. 2006. 310 p.

8. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. 801 с.

### **Сведения об авторах**

**Шакиров Станислав Рудольфович** – кандидат физико-математических наук, заведующий конструкторско-технологическим отделом Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (пр. Академика Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 630090, Россия). E-mail: ShakirovSR@ict.nsc.ru

**Квашнин Александр Георгиевич** – кандидат технических наук, директор Центра трансфера технологий и коммерциализации Новосибирского национального исследовательского государственного Университета (ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия). E-mail: a.kvashnin@nsu.ru

**Писарев Артем Владимирович** – аспирант Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (пр. Академика Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 630090, Россия). E-mail: pisarev@tecon.ru

### **About the authors**

**Shakirov Stanislav Rudolfovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Design and Technological Department of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (6 Akademika Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia). E-mail: ShakirovSR@ict.nsc.ru

**Kvashnin Alexander Georgievich** – Candidate of Technical Sciences, Director of the Center for Technology Transfer and Commercialization of the Novosibirsk National Research State University (Pirogova st., 1, Novosibirsk, 630090, Russia). E-mail: a.kvashnin@nsu.ru

**Pisarev Artem Vladimirovich** – post-graduate student of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (6 Academician Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia). E-mail: pisarev@tecon.ru