

FRI-9.2-1-THPE-06

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF COMBUSTION CONTROL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL INCINERATION OF MUNICIPAL²⁰

Nikolai Dimitrov, PhD Student

Department “Mechanics, mechanical engineering and thermal engineering”, Faculty of Engineering and Pedagogy – Sliven at the Technical University of Sofia
Phone: +44 7505 792129
E-mail: dimitrov.ng@gmail.com

Prof. Koycho Atanasov, PhD

Department “Mechanics, mechanical engineering and thermal engineering”, Faculty of Engineering and Pedagogy – Sliven at the Technical University of Sofia
Phone: +359 892 270 483
E-mail: koycho_atanasov@tu-sofia.bg

Chief Assistant Ivan Ivanov, PhD

Department “Mechanics, mechanical engineering and thermal engineering”, Faculty of Engineering and Pedagogy – Sliven at the Technical University of Sofia
Phone: +359 893 690 882
E-mail: ivov.ivan@tu-sofia.bg

***Abstract:** Municipal solid waste incineration on a reciprocating step grate is the most common way of reducing the volume of landfill and generate energy as a by product. Despite the long history of work in this area, the conventional control methods of these waste-to-energy plants are quite basic. This paper reviews the Advanced Control techniques and model predictive methods discussed in the literature and pre-empts the future research in model predictive method for municipal waste incineration control based on Multiphase Reactor Network.*

***Keywords:** Municipal Solid Waste, Incineration, Combustion Control, Reciprocating Step Grate, Model Predictive Control, Multiphase Reactor Network, Walking Column, PID, FLC, MPC.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Скарното изгаряне на твърди битови отпадъци се явява една от най-старите технологии за редуциране обема на депонирания материал. При това този процес е съпроводен с производство на топлинна енергия за директно използване или последващо конвертиране в електроенергия за собствени нужди или износ към външни потребители.

Въпреки опитите за пробив в газификационни и пиролизни процеси, те не са получили масово приложение поради редица трудности при подготовката на суровината за горене, силно променливия химичен състав и горивни характеристики, и поради трудности в последващото почистване на продуктите от процеса преди подаването им в утилизационните съоръжения или продажба.

Управлението на горивния процес при скарно изгаряне все още е базирано на конвенционални ПИД регулатори поради тяхната широка разпространеност, ниска цена и наличие на специалисти с опит в първоначалното проектиране и последващото настройване при пусковите операции на инсталациите. Наред с тези предимства, ПИД регулаторите имат и редица съществени недостатъци, които водят до неоптимален горивен процес. Основно тези

²⁰ Докладът е представен на Научната сесия на Секция „Топлотехника, хидравлика и пневматика“ на 25 Октомври 2024 г. с оригинално заглавие на български език: ТЕКУЩИ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТВАНЕТО НА СИСТЕМИ ЗА КОНТРОЛ НА ГОРЕНЕТО ПРИ ПРОМИШЛЕНО ИЗГАРЯНЕ НА БИТОВИ ОТПАДЪЦИ.

недостатъци произтичат от факта, че изгарянето на твърди горива е многофакторен и нелинеен процес (Ivanov, St. 2008).

С цел да се идентифицират тези недостатъци и решат множество контролни задачи, редица автори са разработили подобрени методи на база ПИД управление, както и изцяло нови „евристични“ методи. Вече има и предлагане на готови продукти за надграждане на съществуващи контролни системи като тези на Technik Gruppe and Uniper.

Целта на настоящата статия е да направи литературен обзор на част от съвременните методи за интелигентен контрол, които са приложими при скарно изгаряне на битови отпадъци. Следва да се отбележи, че има множество вариации или комбинации от тези методи, до които няма достъп, защото са обект на авторско право или фирмена тайна (Ding, H. 2022).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Оптимизационни задачи

Наред с редуциране на недостатъците при конвенционалните системи за горивен контрол, съвременните системи се стремят към решаване на редица оптимизационни задачи, описани от Leskens в (Leskens, M. 2005), както следва:

Икономически:

- Максимизиране на капацитета за изгаряне на инсинератора, т.е. увеличаване на приходите от преработка на отпадъци (gate fee);
- Увеличаване на ефективността при изгаряне и съответно на енергопроизводството, което съответно максимизира приходите от продажба на енергийни продукти;
- Редуциране на разходите по поддръжка и броя на аварийните спирания поради неоптимален горивен процес, което води до увеличаване на печалбата от дейността;
- Увеличаване на ефективния експлоатационен живот на инсталацията, което съответно увеличава възвращаемостта на инвестицията.

Екологически:

Инсталациите за изгаряне на твърди битови отпадъци отделят следните замърсители в околната среда: димни газове съдържащи SO_x, HCl, HF, NO_x, CO, PCDD и PCDF, както и следи от живак и други тежки метали; твърди остатъци от скарното изгаряне като шлака и пепел и твърди остатъци от почистването на димните газове (Krystev N., Ivan Petrov I. 2024).

Различни изследвания доказват, че някой от тези замърсители се повлияват съществено от начина на управление на горивния процес (Gopaluni, R.V. 2020), (Gu, T. 2019). Оттук може да се дефинира една от основните задачи:

- Минимизиране на емисиите на замърсители, което от своя страна води до редуциране на използването на химически реагенти за почистването на димните газове и съответно количеството на отделените твърди остатъци.

Основи на горивния контрол

Скарното изгаряне на твърди отпадъци е комплексен процес на подгръване и изсушаване на подадения материал, термо-химическа декомпозиция с отделяне на летливите компоненти и последващо окисление. Едновременно с това протичат и множество паралелни процеси като формиране на хлорни, серни и азотни съединения, както и съединения с тежките метали в суровината (Dal Pozzo, A. 2023), (Meynendonckx, W. 2022). Тези съединения кипят при температури близки то температурата, при която нормално протича горивния процес. Физическите параметри на отпадъка, като порьозност и форма на въглеродните частици, разпределение на горивото върху скарата и неговата хомогенност, аеродинамично съпротивление при преминаване на въздуха за горене през горивния слой и други, също участват в тези комплексни, многофакторни и нелинейни процеси, които се поддават трудно на математическо моделиране чрез използване на термодинамичните закони при горене (first-principle models) (De Greef, J. 2023), (Zhuang, J 2022).

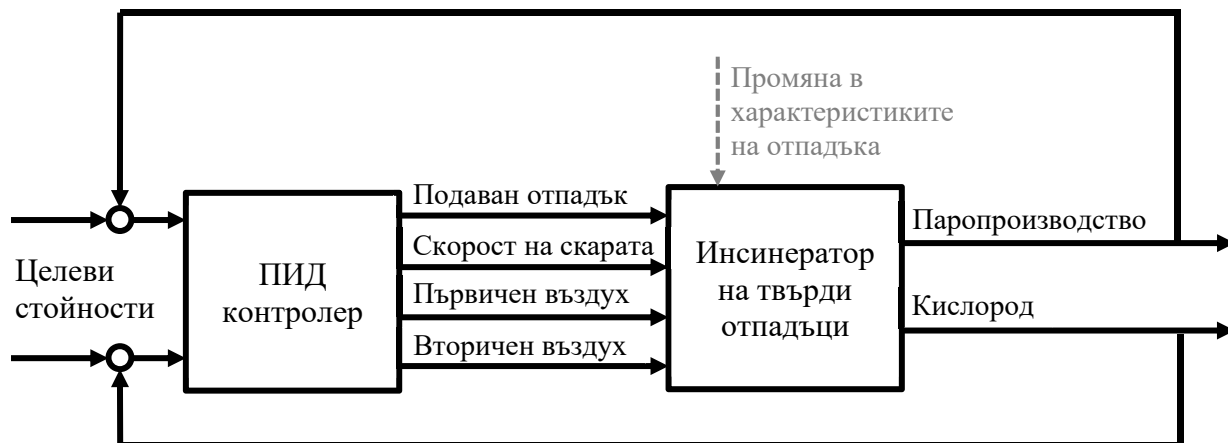
Съгласно (Falconi, F. 2020), индустрията все още разчита на конвенционалните ПИД контролери, които до голяма степен опростяват физическите модели на инсинераторите до еднофакторни линейни процеси. Това води до тесен обхват на контрол, който е неадекватен при изгаряне на отпадъци с характеристики типично изменящи се в широки граници. Съответно постоянната намеса на оператора върху параметрите на контрол е наложителна за постигане на приемлив процес и избягване на аварийни спирания.

При управлението на горивния процес, контролерите основно въздействат върху обема на първичен въздух за горене, както и разпределението му към различните зони на скарата за изгаряне, обема на вторичен въздух за горене, скоростта на подаване на горивото и скоростта на движение на скарата в различните механични зони. Тези параметри се наричат *манипулирани величини*.

Основните процесни параметри, които са обект на контрол са концентрацията на кислород в димните газове, температурен профил в горивната камера и количество на произведената пара (или топлинния товар на инсинератора). Тези параметри се наричат *контролни величини*.

При адаптивните контролери се използват и допълнителни физически и емулирани величини. Като пример за допълнителни физически сензори, необходими за моделно-предсказващо управление могат да се посочат сензорите за налягане на първичния въздух, подаван под скарата. Те индиректно дават информация за дебелината на горивния слой върху скарата. Като пример за емулиран сензор може съответно да се посочи „софт-сензор“ за калоричността на изгаряното гориво разработен от Kessel в (Van Kessel, M. 2002), който в реално време подава информация към адаптивните системи за контрол.

Leskens схематично описва в (Leskens, M. 2005) конвенционална система за горивен контрол базирана на МИМО (multi-input multi-output) ПИД управление, реализирана в две централи за изгаряне на твърди отпадъци в Холандия. Предполага се, че МИМО управлението се състои от няколко каскадно свързани SISO (single-input single-output) ПИД контролера.



Фиг. 1. МИМО управление на база ПИД контролери

Класически методи

ПИД контролери

Управлението на горивния процес при скарно изгаряне все още е широко базиран на конвенционални ПИД контролери. Ding, цитирайки различни източници, в (Ding, H. 2022) посочва, че повече от 90% от индустриалните системи са базирани на конвенционални ПИД контролери поради тяхната „опростена структура, добра надеждност и удобни за манипулиране контролни параметри“.

Като недостатъци на ПИД системите за контрол Falconi (Falconi, F. 2020) посочва „ниската им ефективност при процеси с комплексен механизъм и силно изразена нелинейност“ какъвто практически е процеса на изгаряне на твърди отпадъци. След обобщаване на различни източници могат да се направят следните изводи:

- ПИД контролът води до субоптимални резултати поради факта, че горенето на твърдо гориво е многофакторен нелинеен процес, който трудно се описва в аналитичен вид и съответно съществуващите методики за оптимизиране на контролните параметри са трудно приложими.
- Поради горното, широките амплитуди на изменение на горивните характеристики на битовия отпадък налагат ПИД контролерите да работят в близост до границата на техния контролен диапазон, а и често извън него, което изисква непрекъсната намеса на оператора върху контролните параметри. Това компрометира идеята за напълно автоматизиран процес без участие на човешки фактор в управлението. Съответно, цитирайки Reznik (Reznik, L. 2000), резултатите от производствената дейност са силно зависими от опита и квалификацията на оператора.
- В допълнение ПИД контролът не предлагат механизъм за адаптиране към тенденциите за изменение на процеса. Например битовия отпадък има ясна изразена сезонна цикличност. Също така с времето топлообменните повърхности на парогенератора се замърсяват, което води до изменение на топлинния профил на процеса. Тези и аналогични изменения в процеса изискват адаптиране на контролните параметри за постигане на производствените цели (виж т. 2).
- ПИД системите за контрол не са толерантни на грешки (Fault Tolerant), т.е. отклонение при измерването поради стареене на измервателния прибор например може да доведе до неоптимален горивен процес, повишени емисии или дори аварийно спиране на инсинератора. При тези системи няма механизъм за маскиране на грешките.

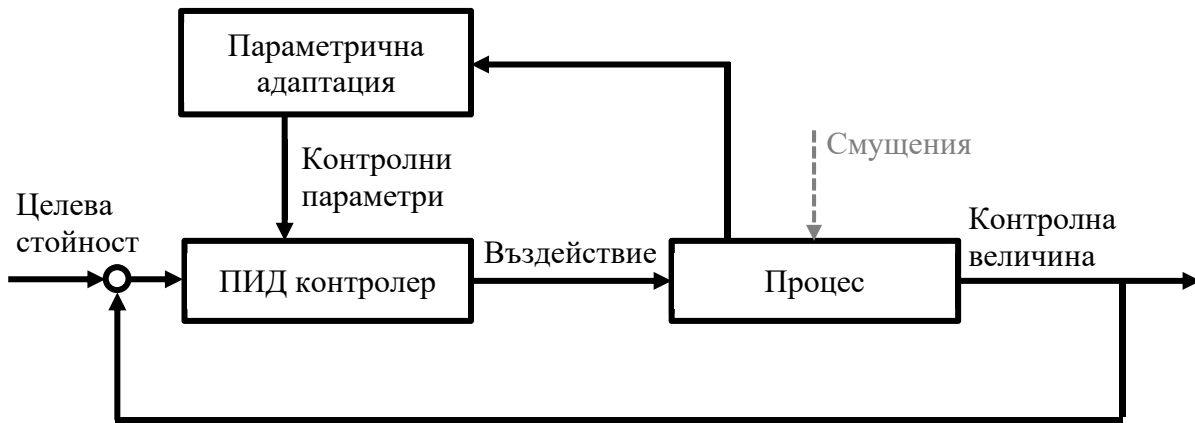
ПИД с параметрична адаптация

Както беше отбелязано по-горе, изгарянето на твърди отпадъци е силно изразен нелинеен процес с широк оперативен диапазон на горивните характеристики на постъпващия отпадък. Съответно ПИД контролер оптимизиран за средно статистическа калоричност ще предлага неоптимален контрол при постъпване на ниско калорично или високо калорично гориво с вероятно силно изразени колебания на горивния процес.

Аналогично ПИД контролер оптимизиран за номинално натоварване на пещта ще предлага неоптимален контрол при редуцирано натоварване т.к. динамиката на топлообмена (скоростта на газовия поток, коефициента на топлоотдаване между газовата среда и тръбните снопове и др.) силно се различава при различни товари, като при това зависимостта е силно изразено нелинейна. Например газовия поток е в квадратична зависимост от скоростта, докато лъчистият топлообмен е в кубична зависимост от температурата.

Параметричната адаптация (gain scheduling) се стреми да разреши този проблем като дефинира групи от пропорционални, интегрални и диференциални контролни параметри за всеки достатъчно тесен сегмент от нелинейния процес, който може да се приеме за линеен. Автоматичния избор на съответната група от контролни параметри се извършва от заложената логика.

Като примерно приложение на параметрична адаптация може да се посочи контрола на излишъка на кислород в димните газове, схематично показан на фиг. 2. При този контролер зададената целева стойност е желаното ниво на кислород (например 6%), манипулируемата величина (въздействието), чрез която контролера коригира процеса на скарното изгаряне е типично скоростта на подаване на горивото. Контролната величина, която отразява резултата от корекцията е измерената концентрация на кислород.



Фиг. 2. ПИД управление а параметрична адаптация

Съответно при този контролен кръг може да се определят няколко групи от ПИД коефициенти, които да се превключват ръчно от оператора или автоматично чрез заложената логика в зависимост от измерен или изчислен специфичен процесен параметър като например изчисления топлинен товар на инсинератора (или измереното паропроизводство).

Процеси с ПИД контрол и параметрична адаптация, които протичат често в близост до зоните на преминаване от едни контролни параметри към други, следва да се проектират така, че да се минимизират стъпаловидните изменения, които са обикновено последвани от нестабилност при управлението.

Един от разпространените начини за решаване на този проблем е чрез програмиране на размита логика (Fuzzy Logic) за превключване между ПИД параметрите.

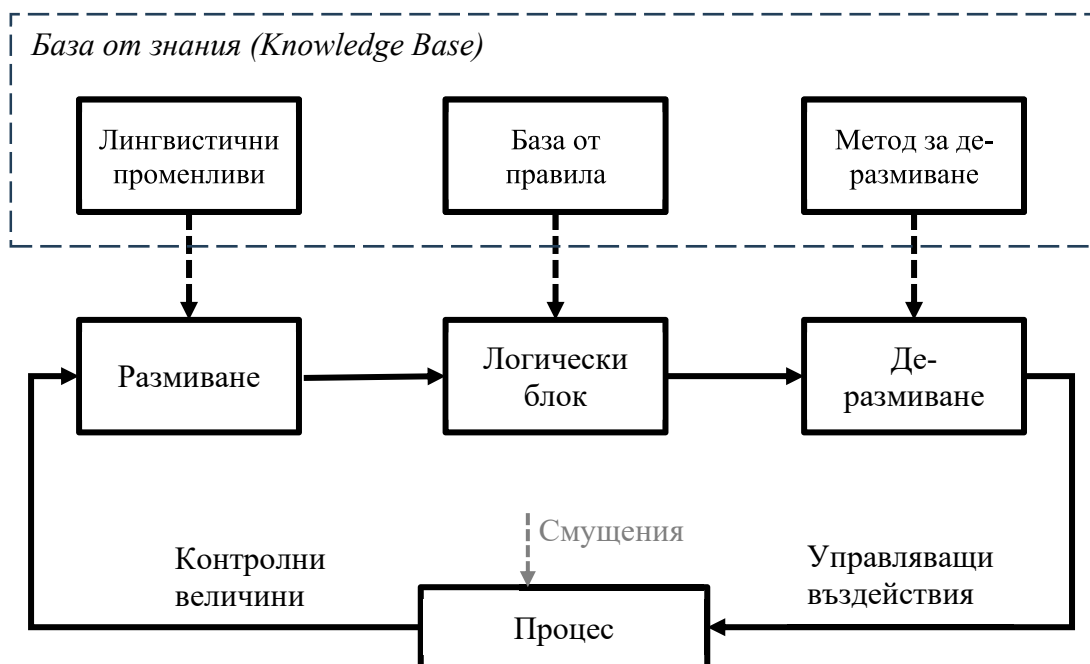
Контрол с размита логика

Принципът на размита логика може да се приложи не само като надстройка на ПИД контролер с цел автоматична адаптация, но и изцяло да замени ПИД контролера при управлението на процеса, както е показано на фиг. 3 (Ivanova, D. 2009), (Reznik, L. 2000).

Kalogirou (Kalogirou, S.A. 2003) систематизира следните преимущества на управлението с размитата логика:

- По-голяма устойчивост при управление сравнено с конвенционални ПИД контролери, тъй като може да покрие значително по-широк контролен диапазон и е по-малко чувствителен към шум в контролните величини и смущения от различно естество.
- Значително по-малки разходи и време за внедряване, сравнено с това на моделно предсказващо управление (виж т.5).
- По-лесно се адаптира към специфичните изисквания на конкретни инсталации тъй като заложената база от правила е в лингвистична форма и съответно лесно разбираема.
- Може да моделира нелинейни процеси с произволна сложност.
- Може да се интегрира с конвенционални контролни методи.

Falconi (Falconi, F. 2020) отбелязва обаче че управлението с размита логика разчита значително на опита на оператора, който конфигурира базата от правила и не толкова на физическия модел на инсталацията. Така, че в някои случаи реакцията на процеса може да се изтълкува погрешно и съответно грешни правила да бъдат заложиени в управлението.



Фиг. 3. Контролер с размита логика

Моделни предсказващи методи

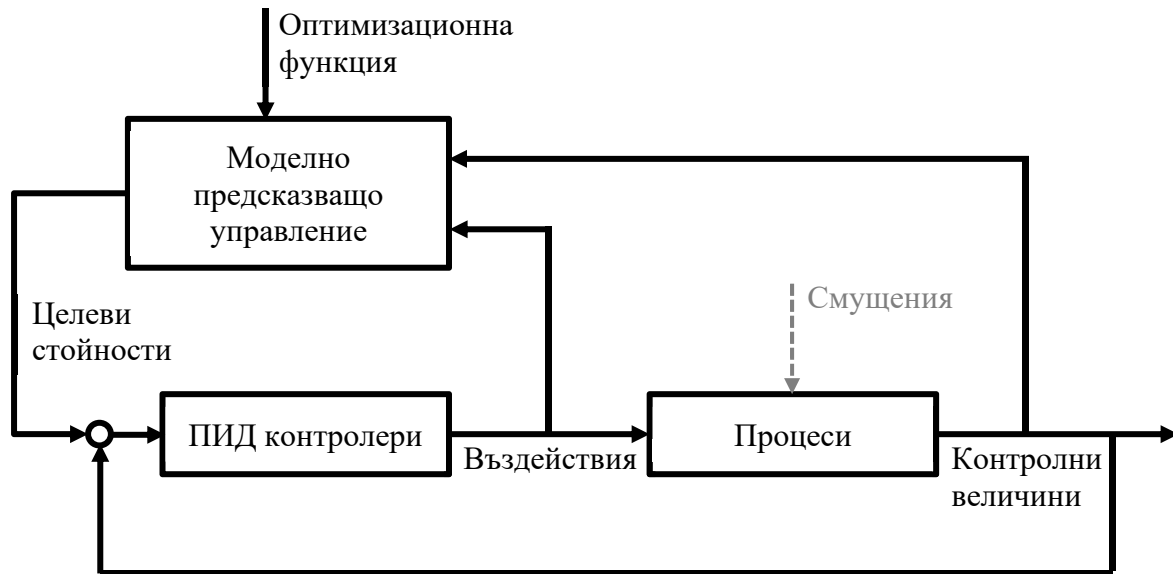
Моделните предсказващи методи са методи за контрол, които включват математически модел на процеса, изчислителен блок (solver) за решаване на оптимизационните задачи и предсказващ хоризонт, до които се изчислява траекторията на реакцията.

За разлика от конвенционалните методи, при този метод контрола може да бъде както с обратна (feedback), така и с права или изпреварваща (feed forward) контролна верига. При управление на горивни процеси, изпреварващия контрол предлага значителни преимущества като например:

- Предварително увеличаване на температурата в горивната камера или температурата на подгриване на първичния въздух за горене при регистриране на тенденция към подаване на отпадък с ниска калоричност. При тази изпреварваща корекция се постига „подготовка“ на инсинератора за подаваната суровина и съответно по-стабилен процес.
- Предварително ограничаване на подаването на отпадък или на първичния въздух за горене при регистриране на тенденция за висококалоричен материал. При тази изпреварваща корекция се постига ограничаване на нарастването на налягането в парния барабан и съответно избягване на аварийни спирания поради достигане на високи налягания в парния барабан.

В близкото минало приложението на моделните предсказващи методи е било ограничено поради ниския изчислителен капацитет на контролните системи. С нарастване капацитета на последните, и с отчитане на безспорните предимства на метода, той намира все по-широко приложение в горивните инсталации за отпадъци – виж Leskens (Leskens, M. 2005)

Falconi (Falconi, F. 2020), предлага реализиране на моделен предсказващ метод на база линейно квадратичен регулатор (Linear Quadratic Regulator). При това възприетата стратегия за контрол на слоя отпадък върху горивната скара е дебелината на този слой във функция на налягането на подавания първичния въздух под скарата.



Фиг. 4. Моделно предсказващо управление на централа

Kong и колектив стигат до заключението, че съвременните оптимизационни цели при управлението на парогенераторите се изместват от решаването на типично инженерни проблеми към решаване на по-скоро икономически и екологични проблеми. В (Kong, X. 2015), те предлагат йерархично моделно предсказващо управление на инсталация от парогенератор и турбина, което в опростен вид е показано на фиг. 4. От диаграмата се вижда че моделно предсказващото управление е позиционирано на йерархически по-високо ниво (ниво централа) и съответно решава оптимизационната задача в зависимост от контролните цели. Като резултат се генерират актуални целеви стойности за ПИД контролерите за управление на горивния процес, паропроизводството и съответно електропроизводството на централата.

Адаптивни методи с изкуствен интелект

Адаптивните методи с използване на изкуствен интелект набират все по-голяма популярност при управление на горивни процеси т.к. те предлагат алтернативен метод за решаване на комплексни оптимизационни задачи, както и на не добре дефинирани проблеми (Kalogirou, S.A. 2003).

Kalogirou (Kalogirou, S.A. 2003) предлага добър обзор на разработените методи за контрол на горивните процеси като например невронни мрежи (вкл. обща регресионна невронна мрежа, групов метод за обработка на данни и други), генетични алгоритми, невронна размита логика, както и хибридни системи. В обзора също се цитират инсталации, в които са приложени разгледаните методи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият обзор на предложените в литературата методи за горивен контрол, които могат да бъдат приложени при изгарянето на твърди отпадъци показва следните основни тенденции на развитие:

- параметрична адаптация на конвенционални ПИД контролери с използване на размита логика или невронни мрежи;
- разработване на контролни вериги чрез използване на моделно предсказване на реакцията на процеса;
- разработване на адаптивни контролери чрез използване на невронни мрежи или генетични алгоритми.

Идеята на авторите е да се продължи настоящото проучване в посока контролни системи с използване на моделен предсказващ метод на основа на нелинеен модел от „първи принцип“ (non-linear first-principal model). По-конкретно моделът ще бъде базиран на мрежа от многофазни реактори (Multiphase Reactor Network), описан в (Vandevelde, R. 2022) и (Vandevelde, R. 2023).

REFERENCES

Dal Pozzo, A. 2023 - Research and Innovation Needs for the Waste-To-Energy Sector towards a Net-Zero Circular Economy. Energies.

De Greef, J. 2023 - Towards WTE and Materials Processes with Advanced Thermochemical Combustion Intelligence In the Circular Economy. Energies.

Ding, H. 2022 - MIMO Modeling And Multi-Loop Control Based On Neural Network For Municipal Solid Waste Incineration. Elsevier.

Falconi, F. 2020 - Control Strategy For The Combustion Optimization For Waste-To-Energy Incineration Plant. Elsevier.

Gopaluni, R.B. 2020 – Modern Machine Learning Tools for Monitoring and Control of Industrial Processes – a Survey. Elsevier.

Gu, T. 2019 - Municipal Solid Waste Incineration In A Packed Bed - A Comprehensive Modeling Study With Experimental Validation. Elsevier.

Ivanov, St. 2008 - Electronic Regulators. Sofia (**Оригинално заглавие:** *Иванов, Св. Цв. 2008 - Електронни регулатори. София*).

Ivanova, D. 2009 - Application of genetic algorithm for tuning of PID controllers. Scientific Proceedings of the University of Rousse - 2009, Volume 48, Series 3.1 (**Оригинално заглавие:** *Иванова, Д. 2009 - Приложение на генетичен алгоритъм за настройка на ПИД регулатори. Научни трудове на русенския университет – 2009, том 48, серия 3.1*).

Ivanova, D. 2009 - Design of fuzzy PID controllers. Scientific Proceedings of the University of Rousse - 2009, Volume 48, Series 3.1 (**Оригинално заглавие:** *Иванова, Д. 2009 - Проектиране на размити ПИД регулатори. Научни трудове на русенския университет – 2009, том 48, серия 3.1*).

Kalogirou, S.A. 2003 - Artificial Intelligence For The Modeling And Control Of Combustion Processes - A Review. Pergamon.

Kong, X. 2015 - Nonlinear Multivariable Hierarchical Model Predictive Control For Boiler-Turbine System. Elsevier.

Krystev N., Ivan Petrov I. “Influence of heat flux density on combustion efficiency in the initial torch section”, Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN: 2738-8549, 2738-8530 vol. 74, no. 3, year 2024, <https://doi.org/10.47978/TUS.2024.74.03.005>.

Leskens, M. 2005 - Model Predictive Control As A Tool For Improving The Process Operation Of MSW Combustion Plants. Elsevier.

Meynendonckx, W. 2022 - Prospective Analysis Of Industrial Data From A WTE Plant. Venice 2022.

Predictive management . Sp. Engineering Review, Issue 2, 2006 (**Оригинално заглавие:** *Предсказващо управление . Сп. Инженеринг ревю, брой 2, 2006*).

Reznik, L. 2000 - PID Plus Fuzzy Controller Structures As A Design Base For Industrial Applications. Pergamon.

Van Kessel, M. 2002 - Online Calorific Value Sensor And Validation Of Dynamic Models Applied To Municipal Solid Waste Combustion. IChemE.

Vandevelde, R. 2022 - Development Of A Reactor Network Model For Thermal Conversion Of Solid Waste In A Grate-Fired Furnace. Venice 2022.

Vandavelde, R. 2023 - Simulation of a 'Walking Column' in a Waste Layer on a Combustion Grate - a Multiphase Reactor Network Modelling Approach.

Zhezhe, Z. 2021 - Prediction of combustion state through a semi-supervised learning model and flame imaging. Elsevier.

Zhuang, J 2022 - Comprehensive Review On Mechanism Analysis And Numerical Simulation Of Municipal Solid Waste Incineration Process. Elsevier.