

СТАНОВИЩЕ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Автор на дисертационния труд: Маг. инж. **Милен Николаев Славов**

Тема на дисертационния труд: **Размито управление на технологични процеси от химическата промишленост**

Член на научното жури: проф. дтн. Красимира Стоилова

Становището е изготвено в качеството ми на член на Научно жури, назначено със заповед № ОЖ-5.2-79/16.10.2025 от Ректора на ТУ-София.

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем
Актуалността на разглежданите проблеми в дисертацията се обуславя от съвременните предизвикателства за непрекъснати технологични подобрения в химическата промишленост. Дисертантът се е насочил към прилагане на подобрени методи за управление, за които не съществуват готови решения, а е необходимо разработване на нови интелигентни подходи за управление с използване на размито управление.

Целта на дисертацията е разработване и индустриално приложение на алгоритми и структури, базирани на размита логика и методи за синтез на основа на експертни знания за обекта, теория на робастното управление и офлайн параметрична оптимизация с генетични алгоритми. Обектът за управление е нивото на разтвора в карбонизационна колона от реална система за производство на калцинирана сода в Девня. Това е сложен технологичен обект за управление, който се характеризира с нелинейност, променливост на параметрите при смяна на режими, натоварване, задание, моделна неопределеност и влияние на смущения.

За постигане на целта дисертантът е формулирал 5 конкретни задачи, успешно решени в дисертацията:

1. Изучаване на обекта за управление и разработване за целите на симулационни изследвания на Модифицирани Такаги-Сугено-Канг (МТСК) модели на база на данни от експерименти.
2. Синтез и промишлена реализация на система за регулиране на ниво на разтвора в карбонизационна колона със Сугено размит регулатор (РР) с вход грешката, без класически модел на обекта на основата на експертни знания и с отчитане на условията за робастна устойчивост и робастно качество.
3. Синтез и промишлена реализация на система за автоматично управление за ниво с РР от размити единици с два входа – с грешка и основно смущение и с грешка и производна на регулируемата величина.
4. Проектиране, промишлена реализация и изследване на система с ПИД адаптивен РР чрез механизъм на паралелно разпределена компенсация за адаптация на коефициентите на РР при метод за синтез чрез оптимизация с генетични алгоритми на параметрите на адаптивен РР.
5. Анализ и извеждане на условия за робастна устойчивост и робастно качество на системата за автоматично управление с адаптивен РР.

2. Степен на познаване състоянието на проблема.

Докторантът е запознат отлично и в детайли с обекта и промишлената инсталация, за което спомага неговата дългогодишна месторабота в „Солвей Соди“ АД. В цялото изложение той демонстрира задълбочено познаване на

широк спектър от знания - основните принципи на теорията на управлението, методи за адаптивно, размито и робастно управление, оптимизация с генетични алгоритми, анализ на данни.

3. Съответствие на избраната методика на съвременните изследване и поставената цел и задачи на дисертационния труд с постигнатите приноси.

Нивото на точност в Карбонизационната колона като обект за управление е нелинеен и нестационарен, подложен на редица смущения. Това затруднява използването на класически линейни регулатори и изисква прилагането на нови подходи за постигане на управление с по-добри показатели за качество каквито предлага размитата логика. Индустриалното внедряване на РР е относително малко съгласно проследените литературни източници въпреки многообразието от структури на размитите регулатори и различните методи за параметричната им оптимизация. Изборът на РР е обусловен от техните предимства, свързани с управление на нелинейни, нестационарни и многосвързани обекти, осигуряване на устойчивост и робастност за широк обхват на работа при наличие на смущения. Докторантът е успял да синтезира размити регулатори с различни конфигурации съгласно поставените задачи не само в програмна среда, но и в реална промишлена система в „Солвей Соди“ АД.

4. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд:

- Синтезирана е система за регулиране на нивото на разтвора в карбонизационна колона със Сугено ПИ размит регулатор с един вход. Оценено е качеството на регулиране по набор от показатели на затворената система с размит регулатор по преходните процеси при смяна в определен диапазон на заданието за ниво и смущението (промяна на налягането на предкарбонизирания разтвор в захранващия колектор) като са изследвани 2 системи. Доказана е устойчивостта и робастността на затворената система. Системата е реализирана в промишлеността и е изследвана в реално време.
- Синтезирана е система за регулиране на нивото на разтвора в карбонизационна колона със Сугено ПИ РР с два входа с компенсация на смущението и с входове грешката и производната на регулируемата величина. Параметрите за настройка на РР се определят off-line чрез оптимизация с генетични алгоритми. Доказана е робастната устойчивост и робастно качество на затворената система. Системата е реализирана и в промишлеността. Изследвани са в реално време три системи с различни параметри по определени показатели за качеството на регулиране и са анализирани резултатите.
- Синтезиран е ПИД РР с 2 входа за грешката и производната на регулируемата величина (нивото на разтвора в карбонизационната колона). Предимството на този подход е, че се запазва стандартната база от правила, но се осигурява по-плавно изменение на управлението при промяна на заданието на регулатора. Параметрите на предварителната и на допълнителната ПИ обработка са настроени с помощта на генетични алгоритми за минимизиране на целевата функция, която включва компоненти за грешката и за дисперсията на управлението. Благодарение на това се постига по-малко износване на изпълнителното устройство и се консумира по-малко енергия от него. Проектираната система с ПИД РР с 2 входа първо е изследвана чрез симулация, за да се предвиди поведението ѝ и качеството на регулиране, след което е внедрена в промишлената инсталация на „Солвей Соди“ АД. Направени са

експерименти като за сравнение е използвана съществуващата система с линеен ПИ регулатор. Преходните процеси на системата с ПИД РР с два входа са с по-кратко време за установяване и по-малко пререгулиране спрямо преходните процеси на системата с линеен ПИ регулатор.

- Проведени са експерименти с карбонизационната колона в реално време и са оценени показателите за качество на регулиране на изследваните системи. Сравнени са 3 системи с ПИД размит регулатор с 2 входа с меки и твърди правила и съществуващата система с линеен ПИ регулатор. Като по-добра е оценена синтезираната система с ПИД РР с два входа с меки правила, съчетаваща висока точност с плавно управление.

Размитият ПИД регулатор има богати възможности, сравнително лесен синтез и удовлетворява изискванията за управление в реално време по отношение на икономично използване ресурсите на индустриален програмируем логически контролер с общо предназначение. В допълнение, използването на Сугено модел с претеглено средно при деразмиване консумира малък изчислителен ресурс. Промислената среда, както и сложните технологични процеси налагат допълнителни изисквания за робастност, енергийна ефективност и осигуряване на дълъг междуремонтен период за скъпите изпълнителни механизми и регулиращи органи. Те се удовлетворяват чрез прилагане на техники за филтриране на шума и смущенията като пълзящо средно и производна на ниво. Подходящите размити правила и оптимизацията на параметрите водят до намаляване на грешката, шума и въздействието на смущенията върху управлението и неговата дисперсия.

- Синтезиран е ПИД адаптивен размит регулатор (АРР) за ниво на разтвор в карбонизационна колона. Създаденият ПИД АРР е на база на Сугено пропорционално-диференциален (ПД) РР и паралелен интегратор на грешката. Чрез модул за паралелно разпределена компенсация е осъществена on-line размита адаптация на параметър на ПД РР или на интегратора в зависимост от текущото ниво или задание. Параметрите на ПИД АРР са оптимизирани с генетични алгоритми. Оптимизацията е по два критерия: минимизиране на средно-квадратичната грешка (или повишаване на точността на управление) и минимизиране на относителната дисперсия на управляващото въздействие спрямо единица задание отнесено към дисперсията на основното смущение (или удължаване на експлоатационния период на изпълнителния механизъм и регулиращия орган и намаляване на въздействието върху останалите карбонизационни колони, които са в работен режим).

- Системата със синтезирания ПИД АРР с 2 входа е изследвана в промишлена среда. Целта е да се анализира влиянието на размитата адаптация на денормализиращия коефициент K_d на изхода на ПД РР с 2 входа 1 изход или на времеконстантата T_i на интегратора върху приети показатели за качество на регулиране като е правено сравнение със система с ПИД РР с два входа 1 изход с фиксирани K_d и T_i .

- Разработен е подход за анализ на устойчивостта на адаптивни системи с размит регулатор на базата на модификация на обединените критерии на Попов за устойчивост на нелинейни системи и на Морари за робастност на линейни системи. Методът се основава на зададени условия за робастна устойчивост и робастно качество на еквивалентна линейна система, която е получена от система с АРР след серия от трансформации. Доказана е еквивалентността на робастната линейна система с АРР. Преходните процеси на робастната еквивалентна линейна система са близки с тези на линеаризирания размит ПИД

регулатор с 1 вход и 1 изход и ПИД размития адаптивен регулатор с 2 входа и 1 изход.

- Анализът на устойчивостта на система с АРР с едновременна адаптация на два параметъра дава възможност за определяне на диапазона им на изменение, така че да се запазва устойчивостта. Разработен е за системи с 1 вход и 1 изход и с 2 входа и 1 изход адаптивен размит регулатор. Подходът не е ограничен само за конкретния обект, но може да се приложи и към други системи с адаптивен размит регулатор с различни принципи на адаптация, както и при разработване на системи с размити регулатори.

Оценявам високо приносите на дисертацията, които са научни, научноприложни и приложни. Особено важно е, че теоретичните изследвания и симулациите не са останали само като модели, но са внедрени за реален промишлен обект в химическото производство.

5. Преценка на публикациите по дисертационния труд:

Значително са надвишени минималните изисквания по този показател - отпечатани са 6 научни публикации с резултати от дисертацията като 1 е с SJR, Q1, [1] ; 2 са с SJR, Q4, [2] и [6]; 1 е индексирана в SCOPUS, [4]. Публикациите са станали достояние на научната общност от различни страни и са цитирани в престижни издания. Публ. [1] има 7 цитирания (1 автоцитиране не се приема); [2] има 4 цитирания; [3] и [4] са с по 1 цитиране.

6. Мнения, препоръки и бележки

Считам, че работата е много добра в теоретично и приложно направление. Синтезирани са интелигентни методи за управление за реален промишлен обект, чието предимство е доказано чрез сравнение не само със съществуващата система за управление, но и с варианти на новосъздадени системи за управление. В резултат се подобрява енергийната ефективност и се удължава живота на изпълнителния механизъм и регулиращия орган. Друг положителен резултат от изследванията е, че тези методи са валидни не само за разглеждания конкретен обект, но могат да намерят приложение и за друг тип нелинейни обекти при производството на сода и в ТЕЦ.

7. Заключение

Дисертацията на маг.инж. Милен Николаев Славов отговаря на условията на ЗРАСРБ и ППЗРАСРБ. **Дисертационният труд съдържа научни, научно-приложни и приложни резултати с иновативен характер. Те имат оригинален принос в науката и промишлеността, които оценявам положително.** Поставената цел на дисертационната работа е изпълнена. Кандидатът притежава задълбочени знания по изследваната тематика. Той демонстрира способност за самостоятелни изследвания и успешно изпълнение на решаваните проблеми. **Приносите на дисертацията оценявам положително. Убедено препоръчвам на Уважаемото научно жури присъждане на образователната и научна степен „доктор“ на маг.инж. Милен Николаев Славов в област на висше образование 5. Технически науки, професионално направление 5.2. Електротехника, електроника и автоматика, научна специалност: Автоматизация на производството.**

Дата: 28.11.2025

ЧЛЕН НА ЖУРИТО:

121

/Проф.д-н.К.Стоилова/



Върно с оригинала

OPINION

of a Dissertation for awarding the educational and scientific degree "Doctor"

Ph.D. student: MEng Milen Nikolaev Slavov

Title of the Ph.D. thesis: Fuzzy Control of Technological Processes in the Chemical Industry

Professional field of study: 5.2 „Electrical engineering, electronics and automation“

Scientific specialty: „Industrial Automation“

Member of the jury: Prof. D.Sc. Krasimira Petrova Stoilova,
Institute of information and communication technologies – Bulgarian Academy of Sciences

This review was prepared in my capacity as a member of a scientific jury, appointed by Order No. ОЖ-5.2-79/16.10.2025 of the Rector of the Technical University-Sofia

1. Actuality of the problems in the PhD thesis

The relevance of the issues considered in the dissertation is determined by the contemporary challenges for continuous technological improvements in the chemical industry. The dissertation candidate has focused on the implementation of improved management methods for which there are no ready-made solutions, but it is necessary to develop new intelligent management approaches using fuzzy control.

The aim of the dissertation is the development and industrial application of algorithms and structures based on fuzzy logic and synthesis methods based on expert knowledge of the object, robust control theory and offline parametric optimization with genetic algorithms. The control object is the solution level in a carbonation column of a real soda ash production system in Devnya. This is a complex technological control object, which is characterized by nonlinearity, variability of parameters when changing modes, load, task, model uncertainty and the influence of disturbances.

To achieve the goal, the dissertation candidate has formulated 5 specific tasks, successfully solved in the dissertation:

1. Study of the control object and development for the purposes of simulation research of Modified Takagi-Sugeno-Kang models based on experimental data.
2. Synthesis and industrial implementation of a solution level control system in a carbonation column with a Sugeno fuzzy controller (FC) with error input, without a classical object model based on expert knowledge and taking into account the conditions for robust stability and robust quality.
3. Synthesis and industrial implementation of an automatic level control system with a FC of fuzzy units with two inputs - with error and fundamental disturbance and with error and derivative of the regulated quantity.
4. Design, industrial implementation and research of a system with PID adaptive FC through a mechanism of parallel distributed compensation for adaptation of FC coefficients in a synthesis method through optimization with genetic algorithms of the parameters of an adaptive FC.
5. Analysis and derivation of conditions for robust stability and robust quality of the automatic control system with an adaptive FC.

2. Degree of knowledge of the state of the problem

The doctoral student is well-versed in the details of the industrial site, which is helped by his long-term employment at Solvay Sodi AD. Throughout the presentation, he demonstrated in-depth knowledge of a wide range of topics - the basic principles of control theory, methods for adaptive, fuzzy and robust control, optimization with genetic algorithms, data analysis.

3. Correspondence of the chosen research methodology and the set goal and tasks of the dissertation with the contributions achieved

The liquid level in the Carbonation Column as a control object is a nonlinear and non-stationary object, subject to a number of disturbances. This makes it difficult to use classic linear controllers and requires the implementation of new strategies to achieve control with better quality indicators such as those offered by fuzzy logic. The industrial implementation of fuzzy controllers is relatively small according to the literature sources reviewed, despite the variety of FC structures and the different methods for their parametric optimization. The choice of fuzzy controllers is determined by their advantages related to the control of nonlinear, non-stationary and multi-connected objects, ensuring stability and robustness for a wide range of operation in the presence of disturbances. The doctoral student was able to synthesize fuzzy controllers with different configurations according to the tasks set not only in a programming environment, but also in a real industrial system at "Solvey Sodi" AD.

4. Scientific and practical achievements in the PhD thesis

- A system for regulating the solution level in a carbonation column with a Sugeno PI fuzzy controller with a single input has been synthesized. The quality of regulation has been assessed by a set of indicators of the closed system with a FC for transient processes when changing the level setpoint and the disturbance (change in the pressure of the pre-carbonation solution in the feed manifold) within a certain range, and 2 systems have been studied. The stability and robustness of the closed system have been proven. The system has been implemented in industry and studied in real time.
- A system for regulating the solution level in a carbonation column with a Sugeno PI FC with two inputs with disturbance compensation and with inputs the error and the derivative of the regulated quantity has been synthesized. The parameters for setting the fuzzy controller are determined off-line by optimization with genetic algorithms. The robust stability and robust quality of the closed system have been proven. The system has also been implemented in industry. Three systems with different parameters have been studied in real time according to certain indicators of the quality of regulation and the results have been analyzed.
- A PID FC with 2 inputs for the error and the derivative of the controlled variable (the solution level in the carbonation column) is synthesized. The advantage of this approach is that the standard rule base is preserved, but a smoother control change is provided when the controller setpoint is changed. The parameters of the preliminary and additional PI processing are tuned using genetic algorithms to minimize the objective function, which includes components for the error and variance of the control. Thanks to this, less wear and tear on the actuator is achieved and less energy is consumed by it. The designed system with a 2-input PID fuzzy controller was first studied through simulation to predict its behavior and the quality of regulation, and then it was implemented in the industrial installation of Solvay Sodi AD. Experiments were conducted, using the existing system with a linear PI controller for comparison. The transient processes of the system with a PID FC with two inputs in the simulations have a shorter settling time and less overshoot compared to the transient processes of the system with a linear PI controller.
- Experiments were conducted with the carbonation column in real time and the control quality indicators of the studied systems were evaluated. Three systems with a PID FC with 2 inputs with soft and hard rules and the existing system with a linear PI controller were compared. The synthesized system with a PID FC with two inputs with soft rules, combining high accuracy with smooth control, was evaluated as better.

The fuzzy PID controller has rich capabilities, relatively easy synthesis, and satisfies the requirements for real-time control in terms of economical use of resources of a general-purpose

industrial programmable logic controller. In addition, the use of the Sugeno weighted average model in defuzzification consumes little computational resource. The industrial environment, as well as complex technological processes, impose additional requirements for robustness, energy efficiency and ensuring a long maintenance period for expensive actuators and regulators. These are met by applying noise and interference filtering techniques such as moving average and level derivative. Appropriate fuzzy rules and parameter optimization lead to a reduction in error, noise and the impact of disturbances on the control and its dispersion.

- A PID adaptive fuzzy controller (AFC) for solution level in a carbonation column has been synthesized. The created PID AFC is based on a Sugeno proportional-differential (PD) FC and a parallel error integrator. An online fuzzy adaptation of a parameter of the PD FC or the integrator has been implemented using a parallel distributed compensation module, depending on the current level or task. The parameters of the PID AFC are optimized using genetic algorithms. The optimization is based on two criteria: minimizing the mean square error (or increasing the control accuracy) and minimizing the relative dispersion of the control effect per unit setpoint relative to the dispersion of the main disturbance (or extending the operating period of the actuator and the regulating body and reducing the impact on the remaining carbonation columns that are in operation).
- The system with the synthesized PID AFC with 2 inputs has been studied in an industrial environment. The aim is to analyze the influence of the fuzzy adaptation of the denormalization coefficient K_d of the output of the PD fuzzy controller with 2 inputs 1 output or of the time constant T_i of the integrator on the adopted control quality indicators, comparing it with a system with a PID fuzzy controller with two inputs 1 output with fixed K_d and T_i .
- An approach for analyzing the stability of adaptive systems with a FC has been developed based on a modification of the combined Popov criteria for the stability of nonlinear systems and Morari criteria for the robustness of linear systems. The method is based on specified conditions for robust stability and robust quality of an equivalent linear system, which is obtained from a system with an adaptive fuzzy controller after a series of transformations. The equivalence of the robust linear system with the AFC is proven. The transient processes of the robust equivalent linear system are close to those of the linearized fuzzy PID controller with 1 input and 1 output and the PID AFC with 2 inputs and 1 output.
 - The analysis of the stability of a system with an AFC with simultaneous adaptation of two parameters allows for determining their range of variation so as to maintain stability. An AFC has been developed for systems with 1 input and 1 output and with 2 inputs and 1 output. The approach is not limited only to the specific object, but can also be applied to other systems with an adaptive fuzzy controller with different principles of adaptation, as well as in the development of systems with fuzzy controllers.

I highly appreciate the contributions of the dissertation, which are scientific, scientifically applied and applied. It is particularly important that the theoretical studies and simulations have not remained just models, but have been implemented for a real industrial site in industry.

5. Assessment of the Ph.D. publications

The minimum requirements for this indicator have been significantly exceeded - 6 scientific publications with results from the dissertation have been printed, 1 with SJR, Q1, [1]; 2 with SJR, Q4, [2] and [6]; 1 indexed in SCOPUS, [4]. The publications have become available to the scientific community from different countries and have been cited in prestigious publications. Publication [1] has 7 citations (1 self-citation is not accepted); [2] has 4 citations; [3] and [4] have 1 citation each.

6. Few assessments, recommendations, and remarks

I think that the work is very good in theoretical and applied directions. Intelligent control methods for a real industrial facility have been synthesized, the advantage of which has been proven by comparison not only with the existing control system, but also with variants of newly created control systems. As a result, energy efficiency is improved and the life of the actuator and the regulating body is extended. Another positive result of the research is that these methods are valid not only for the specific facility under consideration, but can also be applied to other types of nonlinear facilities in the production of soda ash and in thermal power plants.

7. Conclusion

The Dissertation of Milen Slavov **meets the requirements** of the Law on the Educational and Scientific Degree "Doctor" and the Regulations for its implementation.

The dissertation contains scientific, scientific-applied and applied results of an innovative nature. They have an original contribution to science and industry, which I evaluate **positively**. The set goal of the dissertation has been achieved. The candidate possesses in-depth knowledge of the research topic. He demonstrates an ability for independent research and successful implementation of solved problems. **I strongly recommend to the Honorable Scientific Jury the awarding of the educational and scientific degree "Doctor" to MEng Milen Slavov** in the field of higher education 5.2 Electrical engineering, electronics and automation in the scientific specialty: „Industrial Automation”.

28.11.2025

Member of the Scientific Jury: *mi*

/Prof. DSc. Krasimira Stoilova/

Върно с оригинала

