

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie

TEZĂ DE ABILITARE

Modelarea și Controlul Proceselor Biotehnologice

Modeling and Control of Biotechnological Processes

Conf.dr.ing. Marian BARBU

**Domeniul de doctorat,
Ingineria Sistemelor**

Seria AI 8. Nr....

GALAȚI 2015

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie



TEZĂ DE ABILITARE

Modelarea și Controlul Proceselor Biotehnologice

Modeling and Control of Biotechnological Processes

Conf.dr.ing. Marian BARBU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Comisia de abilitare:

.....

.....

.....

Domeniul de doctorat,

Ingineria Sistemelor

Seria AI 8. Nr....

GALAȚI

2015

Seriile tezelor de abilitare susținute public în UDJG începând cu 2015 sunt:

Domeniul **ȘTIINȚE INGINEREȘTI**

Seria AI 1. **Biotehnologii**

Seria AI 2. **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria AI 3. **Inginerie electrică**

Seria AI 4. **Inginerie industrială**

Seria AI 5. **Ingineria materialelor**

Seria AI 6. **Inginerie mecanică**

Seria AI 7. **Ingineria produselor alimentare**

Seria AI 8. **Ingineria sistemelor**

Domeniul **ȘTIINȚE ECONOMICE**

Seria AE 1. **Economie**

Seria AE 2. **Management**

Domeniul **ȘTIINȚE UMANISTE**

Seria AU 1. **Filologie- Engleză**

Seria AU 2. **Filologie- Română**

Seria AU 3. **Istorie**

Rezumat

Teza de abilitare evidențiază realizările și perspectivele activităților didactice și de cercetare ale autorului după susținerea tezei de doctorat la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați în Noiembrie 2006 și obținerea titlului de doctor, confirmat de Ministerul Educației și Cercetării prin ordinul nr. 632 din 21.03.2007. Cercetările autorului continuă în bună măsură tradiția colectivului din care face parte: aplicarea metodelor convenționale și avansate de modelare și conducere automată pentru procesele complexe, cu punerea în aplicare a rezultatelor obținute pe instalații reale de diverse dimensiuni existente în cadrul laboratoarelor din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați sau la alți parteneri de cercetare. Sunt incluse rezultate din domeniile principale de cercetare abordate, menționând cele mai importante lucrări științifice publicate după susținerea tezei de doctorat, precum și contractele de cercetare în care am fost implicat. Aspectele concrete se referă la rezultatele obținute în domeniul modelării și controlului proceselor biotehnologice, al modelării proceselor neliniare, al proiectării și implementării structurilor de control adecvate acestor procese, cât și contribuțiile aduse la dezvoltarea unor noi strategii avansate de control.

După o prezentare succintă a parcursului profesional până la acest moment, sunt evidențiate realizările științifice și profesionale semnificative ale autorului în domeniul modelării și controlului proceselor biotehnologice. Astfel, mai întâi sunt prezentate principalele tipuri de procese biotehnologice abordate de către autor: procese de biosinteză și procese de tratare a apelor uzate. Pornind de la aceste două categorii generale de procese biotehnologice, studiile realizate privind modelarea lor au vizat: obținerea de modele simplificate, în cazul în care scopul urmărit era de dezvoltare a unor estimatoare de stare și de parametri sau a unor metode de control bazate pe starea sistemului, sau de modele complexe, în cazul în care scopul urmărit a fost cunoașterea sistemului sau implementarea unor metode de control de tip intrare-ieșire. Astfel, pentru procesul de creștere fotosintetică a microalgelor este propus un model simplificat prin analiza frecvențială a modelului complet și prin eliminarea ecuațiilor algebrice. Pentru cuplajul aceluiași proces de creștere fotosintetică a microalgelor cu un digester anaerob s-a urmărit utilizarea unor modele complexe, de ordin superior, care sunt liniarizate și procesate pentru reducerea ordinului pe baza analizei Hankel, scopul urmărit fiind obținerea modelelor adecvate problemei controlului la nivelul subsistemelor sau la nivelul întregii instalații. În cazul sistemelor recirculante de acvacultură s-a realizat o modelare integrată a acestor sisteme ținând cont de fenomenele ce au loc atât la nivelul sistemului biologic, al populației piscicole, dar și la nivelul sistemului microbiologic, al calității apei. În consecință, s-a propus un model cu parametri distribuți bazat pe ecuațiile cu derivate parțiale ale formării biofilmului și consumului de substrat și pe cineticile de reacție de tip ASM1 și ASM3, model identificat pe baza datelor preluate din instalația pilot de acvacultură din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați. Modelul obținut poate fi utilizat ca un emulator de proces pentru analiza completă a biofiltrului trickling, permițând testarea prin simulare numerică a comportamentului acestuia în diverse situații, unele foarte dificil de obținut practic pentru că ar putea afecta populația de microorganisme sau materialul piscicol. De asemenea, s-a propus un model cu parametri concentrați pe baza analizei proceselor la nivelul biofilmului. Acest model, foarte util în probleme de conducere automată, poate fi utilizat doar în cazul sistemelor în care biofilmul nu are o grosime excesivă și a necesitat considerarea unor ipoteze care să permită tratarea biofiltrului trickling printr-un model cu parametri concentrați. Tot în cazul aceluiași proces s-a realizat tratarea biofilmului prin intermediul unui filtru adaptiv, permițând astfel analiza sensibilității modelelor frecvențiale pentru fiecare canal intrare – ieșire. Pentru procesele de tratare a apelor uzate cu nămol activ au fost studiate două tehnologii diferite: cea cu nămol granular și cea cu nămol suspendat. Pentru prima tehnologie s-a propus un model în care, pentru cele două faze de operare (anaerobă și aerobă), sunt utilizate modele de amestec diferite, modelul obținut fiind mult mai apropiat de realitatea fizică, în raport cu cele existente până la momentul propunerii acestuia. În cea de a doua tehnologie, s-a reușit modelarea instalației de tratare de la nivelul orașului Galați.

Următoarea secțiune a fost destinată studierii estimării robuste a stării și parametrilor proceselor biotehnologice. Cercetările în acest domeniu au avut loc în majoritate în cadrul studiilor mele

doctorale, fiind puse în evidență performanțele acestor tipuri de estimatoare în cazul proceselor biotehnologice, puternic afectate de incertitudini parametrice și zgomot de măsură și în cazul cărora accesul la soluțiile pentru măsurarea on-line a mărimilor de stare este fie foarte dificil, fie foarte scump. Rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat au fost completate prin obținerea unui observer în regim alunecător în cazul procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ.

În continuare, studiile realizate au vizat propunerea de metode noi sau adoptarea unor metode moderne de conducere automată și utilizarea acestora în cazul controlului proceselor biotehnologice. Metodele propuse sau adoptate au avut în vedere specificul acestor tipuri de procese, în special aspectele legate de caracterul neliniar al acestora, dificultatea realizării de măsurători on-line asupra principalelor mărimi de stare și incertitudinile ce afectează parametrii modelelor construite. Mai întâi, a fost realizat controlul predictiv al procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ, care este una din primele aplicații de control predictiv pe acest tip de proces. Aplicarea soluției de control predictiv s-a realizat utilizând o rețea neuronală ca model de predicție, soluția fiind validată prin simulare numerică. În continuare este prezentată implementarea practică, pe o instalație de laborator, a soluției de control liniarizant exact pentru un proces de creștere fotoautotrofică a microalgelor. Structura de control propusă integrează în timp real modelul global de creștere autotrofică pentru furnizarea unor mărimi care nu sunt accesibile pentru măsurare on-line. În cadrul cercetărilor privind conducerea bazată pe date a proceselor am avut ca prim obiectiv obținerea de informații care să faciliteze implementarea VRFT (Virtual Reference Feedback Tuning) în cadrul metodologiilor curente de control al proceselor industriale. Un prim aspect vizat a fost stabilirea posibilităților de utilizare în procesele reale (instalații de epurare etc.) a metodologiei VRFT, din punctul de vedere al semnalelor de intrare aplicate pentru culegerea datelor, precum și stabilirea modalității de alegere a modelului de referință și a ordinului compensatorului din structura regulatorului. Astfel, a fost propusă o procedură iterativă de rezolvare, care vizează inclusiv obținerea unui regulator PID prin metodologia VRFT. Al doilea aspect vizat a fost stabilirea unei metode de sinteză a legii de comandă pornind de la datele de intrare - ieșire ale procesului, în situația când acesta are timp mort semnificativ și/sau exces de poli important (≥ 2) în funcția de transfer. Deci, metoda este destinată proceselor la care se utilizează procedura clasică Ziegler - Nichols de acordare a reguletoarelor. În continuare este prezentată proiectarea și implementarea practică a unei soluții de control robust al oxigenului dizolvat într-o instalație pilot de tratare a apelor uzate existente în cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați. Regulatorul utilizat a fost proiectat folosind metoda QFT (Quantitative Feedback Tuning), rezultatele obținute din proces justificând pe deplin alegerea acestei soluții. Regulatorul proiectat oferă bune rezultate având în vedere variațiile mari ce afectează procesul, în special variația concentrației de biomasă din bazinul aerob. În finalul secțiunii privind controlul proceselor biotehnologice, sunt propuse două metode de diminuare a influenței perturbațiilor determinate de variațiile diurne ale influentului din instalațiile de tratare a apelor uzate. O primă soluție propusă a fost de utilizare a unui regulator rezonant. Pentru implementarea acestei soluții s-a stabilit o soluție adecvată pentru identificarea procesului, s-au pus în evidență modificările parametrilor modelului identificat la schimbarea regimului de operare al procesului și s-a utilizat în procedura de sinteză un regulator robust de tip QFT. Rezultatele obținute ilustrează o creștere importantă a performanțelor sistemului de reglare a procesului atunci când se utilizează reguletoarele PI+R, față de cazul utilizării reguletoarelor PI. Cum variațiile diurne ale influentului se abat de la o formă perfect periodică, fiind afectate de neregularități, rezultatele obținute utilizând controlul rezonant sunt mai modeste. În acest caz, este necesar ca modelul perturbațiilor diurne, de forma unui spectru de armonici, să fie înlocuit cu o funcție spectrală continuă a perturbației. Soluția adoptată în sinteza regulatorului a fost de utilizare a unui sistem de ordin fracționar a cărui caracteristică de frecvență, de tip unimodal, este de tipul unei „înfășurători” a valorilor maxime corespunzătoare rezonanțelor din structura PI+R a regulatorului.

În finalul tezei se prezintă planul de dezvoltare a carierei, fiind prezentate principalele direcții privind activitatea de cercetare și didactică a autorului. Aceste aspecte sunt prezentate raportat la situația actuală, putându-se astfel aprecia capacitatea autorului de realizare a acestor planuri.

Abstract

The habilitation thesis emphasises the author's teaching and research achievements and perspectives after the public defence of his PhD thesis at "Dunărea de Jos" University of Galați in November 2006 and the conformation of his doctoral title by the Ministry of Education and Research as per Order no. 632/21.03.2007. The author's research activity continues to a large extent the tradition of the research group that he belongs to: applying conventional and advanced methods in modelling and automatic control for complex processes, with the implementation of the results in real installations of various sizes available in the laboratories of "Dunărea de Jos" University of Galați or at other research partners. I have included the results from the main research interests, noting the most important scientific papers published after the public defence of my PhD thesis as well as the research projects that I have been involved in ever since. The concrete aspects refer to the results obtained in the field of biotechnological processes modelling and control, of nonlinear processes modelling, of designing and implementation of adequate control structures for these processes, as well as the contributions brought to the development of a new advanced control strategies.

After briefly summarising the author's career up to this point, the thesis highlights his significant scientific and professional achievements in the field of biotechnological processes modelling and control. Firstly, the thesis presents the main types of biotechnological processes approached by the author: biosynthesis processes and wastewater treatment processes. Starting from these two general categories of biotechnological processes, the studies regarding their modelling focused on obtaining simplified models in the cases where the purpose was to develop certain state and parameter estimators or some control methods based on the system state, or obtaining complex models when the purpose was to understand the system or to implement certain input-output control methods. Thus, in the case of the photosynthetic microalgae growth process, a simplified model was suggested by using frequency analysis of the full model and by eliminating the algebraic equations. For the coupling of the same photosynthetic microalgae growth process with an anaerobic digester, the focus was on using some complex models, of superior order, which are linearized and processed so as to reduce the order on the basis of the Hankel analysis in order to obtain adequate models for the control issue at the subsystem level or at the level of the entire installation. In the case of the recirculating aquaculture systems, an integrated modelling of these systems was used keeping in mind the phenomena taking place both at the level of the biological system, of the fish population, and at the level of the microbiological system, that of the water quality. Consequently, a distributed parameter model was suggested based on the partial derivative equations for biofilm formation and substratum consumption and on the reaction kinetics of ASM1 and ASM3 type, model identified on the basis of the data collected from the pilot aquaculture plant of "Dunărea de Jos" University of Galați. The model obtained this way can be used as a process emulator for the complete analysis of the trickling biofilter, allowing the testing of its behaviour by numerical simulation in various situations, being very difficult to actually obtain some of them since it could affect the microorganism population or the fish material. A model with concentrated parameters was also suggested on the basis of the analysis of the processes at the biofilm level. This model, very useful in control problems, can be used only in the case of systems where the biofilm does not have an excessive thickness and it determined the use of some hypothesis which would allow considering the trickling biofilter through a model with concentrated parameters. In the case of the same process, considering the biofilter was done by means of an adaptive filter, thus permitting the sensitivity analysis of the frequency models for each input-output channel. Two different technologies were studied for wastewater treatment processes with activated sludge: one with granular sludge and another with suspended sludge. For the first mentioned technology a model was suggested in which, for the two operation phases (the anaerobic and the aerobic), different mixing models ore employed, the model thus obtained being much closer to the physical reality as compared to existing models at that time. As far as the second mentioned technology is concerned, a model was successfully implemented for the Galați city wastewater treatment plant.

The next section was dedicated to the study of the robust estimation of the biotechnological processes state and parameters. The research in this area was done mostly as part of my doctoral studies highlighting the performance of these estimators in the case of biotechnological processes. These processes are strongly affected by parametrical uncertainty and measurement noise and the access to solutions for on-line measurement of state variables is either very difficult, or very expensive. The results of my doctoral studies were completed by obtaining a sliding mode observer for the wastewater treatment process with activated sludge.

Further on, my studies were focused on proposing new methods or adopting modern methods of automatic control and using them in the case of biotechnological processes control. The proposed or adopted methods took into account the specificity of these types of processes, especially those aspects related to their nonlinear nature, the difficulty of on-line measuring of the main state variables and the uncertainties affecting the parameters of the suggested models. First of all, the predictive control of the wastewater treatment process with activated sludge was proposed, which is one of the first predictive control applications for this kind of process. The predictive control solution was applied using a neuronal network as a prediction model, the solution being validated by numerical simulation. Then, the thesis presents the practical implementation, on a laboratory installation, of the exact linearizing control solution for the microalgae photoautotrophic growth process. The suggested control structure integrates in real time the global model of autotrophic growth in order to obtain some variables that are not accessible for on-line measurement. The main objective of our research on data-driven based process control was to obtain information that would facilitate the implementation of VRFT (Virtual Reference Feedback Tuning) in the current methodologies for industrial processes control. The aspect that I firstly focused on was to establish the possibilities to use VRFT technology in real processes (wastewater treatment plants etc.) from the viewpoint of the input signals applied for data gathering, as well as to establish the selection method of the reference model and of the dynamic compensator order from the controller structure. In doing so, I suggested an iterative solving procedure which aims at obtaining a PID controller through VRFT methodology. The second aspect I focused on was to establish a method to synthesise the control law starting from the input-output data of the process when there is a significant time delay and/or the pole excess of the transfer function is important (≥ 2). Therefore, the method is meant for those processes that use the classic Ziegler-Nichols tuning method. Further on, I present the design and practical implementation of a robust solution for the dissolved oxygen control in a pilot wastewater treatment plant existing at "Dunărea de Jos" University of Galați. The controller was designed using the QFT (Quantitative Feedback Tuning) method, the results fully justifying the selection of this solution. The designed controller offers good results taking into account the large variations affecting the process, especially the variations of biomass concentration from the aerobic tank. The final part of the section regarding the control of biotechnological processes suggests two methods of reducing the influence of the disturbances determined by the diurnal variations of the influent in the wastewater treatment plants. The first solution suggested was to use a resonant controller. In order to implement this idea, an adequate solution was established to identify the process, the changes of the parameters of the identified model that appear when changing the process operating regime were highlighted and a QTF robust controller was used in the synthesis procedure. The results illustrate a significant increase in the performance of the process control system when PI+R controllers are used as compared to the case when PI controllers are used. Since the diurnal variations of the influent divert from a perfectly periodic shape, being affected by irregularities, the results obtained by using resonant control are more modest. In this case, it is necessary for the diurnal disturbance model, in the form of a harmonic spectrum, to be replaced with a continuous spectral function of the disturbance. The solution adopted for the synthesis of the controller was to use a fractional-order system whose frequency characteristic, of unimodal type, could be kind of a "wrapped" of maxima corresponding to the resonant filters from PI+R controller structure.

The end of the thesis presents the career development plan, including the main research and teaching directions of the author. These aspects are presented in correlation with the current situation so as the author's capacity to fulfil these plans can be evaluated.