Обобщено предсказващо управление на емисиите на азотни оксиди (NOx) в електроцентрала с комбиниран цикъл

В. Руйкова

Generalized Predictive Control of Nitrogen Oxide (NOx) Emissions in a Combined Cycle Power Plant

V. Ruykova

Technical University of Sofia, Bulgaria, velichka.ruykova@tu-sofia.bg

Key Words: *Generalized predictive control; disturbance compensation; feedforward control; time-delay; nitrogen oxides (NOx).*

Abstract. *This paper describes a NOx control system in a combined cycle power plant. The aim is to increase the control performance of a NOx decomposition process by improving measurable disturbance compensation. Extended Generalized Predictive Control algorithm is used. The typical predictive model in GPC algorithms (ARIMAX) is extended by a measurable disturbance vector.*

Въведение

Смущенията отклоняват системата от желаната работна точка и изискват специфични стратегии и подходи за управление, за да се сведе до минимум тяхното влияние [1]. Класическото управление с пренасочване (feedforward control) на измеримите смущения е най-често срещаното решение за справяне с този проблем. Чрез управлението с пренасочване измеримите смущения могат да бъдат компенсирани (отхвърлени). Този вид управление дава възможност за изработване на управляващия сигнал, преди смущаващият да повлияе на изхода на процеса. Въпреки това в много области на промишлеността системите за управление (СУ) се реализират само с обратна връзка. Чрез управлението с обратна връзка се осигурява следене на заданието, намаляване на отклоненията на изхода от неговата желана стойност, намаляване на разсъгласуването, както и компенсиране на незначителни смущаващи въздействия. Поради опростената структура на СУ с обратна връзка управлението се съсредоточава само върху един от двата проблема – отработване на заданието или смущението [2,3].

Отношението на динамиката между изхода на процеса и смущението, от една страна, към динамиката между изхода на процеса и управляващия сигнал с обратен знак, от друга, формира идеалния компенсатор. Такова устройство обаче рядко може да се реализира поради невъзможност за инверсия на закъснението например [2,4]. ОПУ е в състояние да осигури едновременно следене на заданието и пълна компенсация с пренасочване по неявен начин на измеримите смущения, когато те са отчетени в алгоритъма. Това обаче се постига за сметка на по-агресивен управляващ сигнал.

Методика за проектиране на разширен обобщен предсказващ регулатор

Този метод за проектиране на обобщен предсказващ регулатор (ОПР) предполага, че обектът адекватно се представя от ARIMAX модела

$$A\left(q^{-1}\right)y(k)=B\left(q^{-1}\right)q^{-d}u(k-1)+ +D\left(q^{-1}\right)q^{-dv}v(k)+\frac{C\left(q^{-1}\right)}{\Delta}\xi(k), \quad (1)$$

разширен с вектора на измеримото смущение .

В модела A, B, C и D са полиноми на оператора q^{-1} от степени n_a, n_b, n_c и n_d съответно; d – брой тактове закъснение между входа и изхода на процеса; d_v – брой тактове закъснение между смущението и изхода на процеса; y, u, v и ξ са съответно изходът на обекта, неговият вход (управлението в системата), измеримото смущение и неизмеримо смущение от типа бял гаусов шум; чрез $\Delta = 1 - q^{-1}$ се осигурява интегрално действие на регулатора.

Извежда се предсказаният изход y, като нерекурсивно се решават три Диофантови уравнения [5]. Предсказаният изход $\hat{y}(k+j|k)$ се представя като сума от две компоненти:

(2) $\hat{y}(k+j \mid k) = \hat{y}_{пр}(k+j \mid k) + \hat{y}_{непр}(k+j \mid k)$.

Първата компонента, т. нар. *принудена компонента*

$$\hat{y}_{пр}(k+j \mid k) = H_j^f\left(q^{-1}\right)\Delta u(k+n_e) + \\ + H_j^{df}\left(q^{-1}\right)\Delta v(k+n_e+\rho_d+1)$$

зависи от изменението на управляващия сигнал в k-тия и след k-тия момент и изменението на измеримото смущение след k-тия момент, където $\rho_d = d - d_v$ е относителната разлика между закъснението, между входа и изхода на процеса и закъснението, между смущението и изхода на процеса.

Втората компонента, т. нар. *непринудена компонента*

$$\hat{y}_{непр}(k+j \mid k) = H_j^p\left(q^{-1}\right)\Delta u^F(k-1) + F_j\left(q^{-1}\right)y^F(k) + \\ + H_j^{dp}\left(q^{-1}\right)\Delta v^F(k),$$

дефинирана с филтрираните сигнал

$\Delta u^F(k-1) = 1/C\left(q^{-1}\right)\Delta u(k-1)$, $y^F(k) = 1/C\left(q^{-1}\right)y(k)$,
$\Delta v^F(k) = 1/C\left(q^{-1}\right)\Delta v(k)$ представлява предсказаната стойност на възстановимия изход $\hat{y}(k+j \mid k)$ на САУ при отсъствие на управляващо и смущаващо въздействие върху обекта ($\Delta u(k+j)= 0$, $\Delta v(k+j) = 0$), . Зависи от изменението на управляващия сигнал до $k-1$-вия момент, от изходния сигнал и от смущаващото въздействие до k-тия момент включително. След формиране на сигналите в системата като вектори [5] двете компоненти и предсказаният изход (2) се представят в матричен вид:

$$\hat{y}_{пр} = H^f u + H^{df} v, \quad \hat{y}_{непр} = H^P u_p^F + F y_p^F + H^{dp} v_p^F,$$

(3) $\hat{y} = \hat{y}_{пр} + \hat{y}_{непр}$ или $\hat{y} = H^f u + H^{df} v + \hat{y}_{непр}$,

H^f, H^{df}, H^p, F и H^{dp} и са матрици с размерности $(n_{e_2} - n_{e_1} + 1)\times N_u$, $(n_{e_2} - n_{e_1} + 1)\times N_v$, $(n_{e_2} - n_{e_1} + 1)\times(d+n_b)$, $(n_{e_2} - n_{e_1} + 1)\times(n_a+1)$, $(n_{e_2} - n_{e_1} + 1)\times(d_v+n_d)$ съответно.

n_{e_1} и n_{e_2} са съответно минимален и максимален хоризонт на грешката на управлението; N_u и N_v са съответно хоризонт на управление и хоризонт на оценката на смущението [6], $N_v \le N_2$ като обикновено $N_v = N_u$, $N_2 = d + 1 + n_{e_2}$ е максимален хоризонт на предсказване. u^F_p, y^F_p и v^F_p са вектори, съставени съответно от $\Delta u^F(k-1)$, $y^F(k)$ и $\Delta v^F(k)$.

Минимизира се квадратичен показател от вида

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2}\delta(j)[\hat{y}(k+j|k) - r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u}\lambda(j)[\Delta u(k+j-1)]^2,$$

където r е заданието в системата; $N_1 = d + 1 + n_{e_1}$ е минимален хоризонт на предсказване; $\delta(j)$ и $\lambda(j)$ са тегловни коефициенти, също се представя в матричен вид:

(4) $J = (\hat{y} - r)^T Q_\delta(\hat{y} - r) + u^T Q_\lambda u$,
$Q_\delta = \{\delta_{n_{e_1}}, \delta_{n_{e_1}+1}, \ldots, \delta_{n_{e_2}}\}$ и $Q_\lambda = \{\lambda_0, \lambda_1, \ldots, \lambda_{N_u-1}\}$

са диагонални тегловни матрици. Като се отчете (3), описание (4) може да се представи като

$$J = \left(H^f u + H^{df} v + \hat{y}_{непр} - r\right)^T Q_\delta\left(H^f u + H^{df} v + \hat{y}_{непр} - r\right) \\ + u^T Q_\lambda u \text{ или}$$

$$J = u^T H u + g^T u + c^T Q_\delta c, \quad H = H^{f^T} Q_\delta H^f + Q_\lambda,$$

(5) $g^T = 2c^T Q_\delta H^f$, $c = \left(H^{df} v + \hat{y}_{непр} - r\right)$.

Когато няма наложени ограничения върху управляващия сигнал, минимумът на (5) се намира, като се положи градиентът на J да е равен на нула. Това води до оптималното решение

(6) $u = -H^{-1}g = \left(H^{f^T} H^f + \lambda I\right)^{-1} H^{f^T}\left(r - H^{df} v - \hat{y}_{непр}\right)$.

От вектора на решението се използва само първият елемент ($u(1) \equiv \Delta u(k)$),

$$\Delta u(k) = [1 \quad 0 \quad \ldots \quad 0] * \\ * \left(H^{f^T} H^f + \lambda I\right)^{-1} H^{f^T}\left(r - H^{df} v - \hat{y}_{непр}\right),$$

(7) $\Delta u(k) = K\left(r - H^{df} v - \hat{y}_{непр}\right)$.

Многостъпковото предсказване на изхода се осъществява като непрекъснато повторение на така описаната процедура на проектирането на всеки следващ такт на времето, което означава многократно да се решава (7) с обновяване само на векторите r, H^{df} v и $\hat{y}_{непр}$.

$$\Delta u(k) = \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1} r(k+j) - \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1} H_j^{df}\left(q^{-1}\right)\Delta v(k+1) \\ - \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1}\frac{F_j\left(q^{-1}\right)}{C\left(q^{-1}\right)}y(k) - \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1}\frac{H_j^p\left(q^{-1}\right)}{C\left(q^{-1}\right)}\Delta u(k-1) \\ - \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1}\frac{H_j^{dp}\left(q^{-1}\right)}{C\left(q^{-1}\right)}\Delta v(k).$$

Като се отчете, че заданието остава постоянно в рамките на хоризонта на управление, може да се изведе в линеен вид следният обобщен предсказващ регулатор:

$$R\left(q^{-1}\right)\Delta u(k) = T\left(q^{-1}\right)r(k+N_2) - S\left(q^{-1}\right)y(k) - \\ - \left(Q_f\left(q^{-1}\right) + Q_p\left(q^{-1}\right)\right)\Delta v(k+1),$$

$$R\left(q^{-1}\right) = C\left(q^{-1}\right) + \sum_{j=N_1}^{N_2} k_{j-N_1+1} H_j^p\left(q^{-1}\right)q^{-1},$$

$$T\left(q^{-1}\right)=C\left(q^{-1}\right)\sum_{j=N_1}^{N_2}k_{j-N_1+1}q^{-N_2+j}\ ,$$

$$S\left(q^{-1}\right)=\sum_{j=N_1}^{N_2}k_{j-N_1+1}F_j\left(q^{-1}\right),$$

$$Q_f\left(q^{-1}\right)=C\left(q^{-1}\right)\sum_{j=N_1}^{N_2}k_{j-N_1+1}H_j^{df}\left(q^{-1}\right),$$

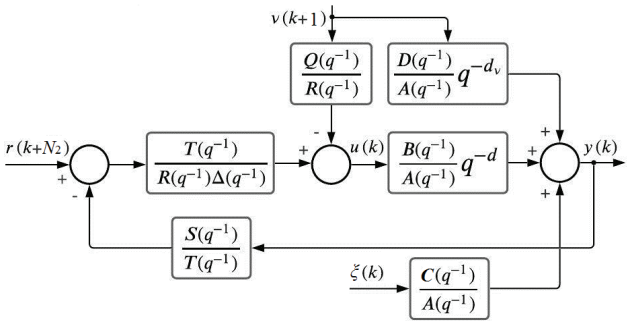
$$Q_p\left(q^{-1}\right)=\sum_{j=N_1}^{N_2}k_{j-N_1+1}H_j^{dp}\left(q^{-1}\right)q^{-1}\ ,$$

(8)

$$Q_f\left(q^{-1}\right)+Q_p\left(q^{-1}\right)=Q\left(q^{-1}\right).$$

Q_f и Q_p са полиноми, включващи коефициентите на миналите и бъдещите стойности на смущението, които се изчисляват по различни начини в зависимост от ρ_d[7].

На *фиг. 1* е показана структурна схема, базирана на изведения закон за управление.



Фиг. 1. Разширена структурна схема на GPC за компенсиране на измеримото смущение

Нека уравнение (6) се запише във вида

$$u=\left(H^{f^T}H^f+\lambda I\right)^{-1}H^{f^T}*$$
$$*\left(r-H^{df}v-H^P u_p^F-Fy_p^F-H^{dp}v_p^F\right) \quad (9)$$

и се приеме, че грешката в контура на обратната връзка *(фиг. 1)* и заданието са нула, r(j) = 0 за j = k + N_1 ... k + N_2, тогава y^F_p = y(k) = 0, u^FP = Δu(k - 1) = 0 .

Така уравнение (9) придобива вида

$$u=\left(H^{f^T}H^f+\lambda I\right)^{-1}H^{f^T}\left(-H^{df}v-H^{dp}v_p^F\right). \quad (10)$$

Само когато в (10) се замести с λ = 0, се получава стандартната структура на компенсатор с пренасочване

$$u=-H^{f^{-1}}\left(H^{df}v+H^{dp}v_p^F\right), \quad (11)$$

при която динамиката между изхода на процеса и смущението се разделя на динамиката между изхода на процеса и управляващия сигнал с обратен знак.

Ако в уравнение (11) се отчитат само текущите измерими смущения v^F_p = Δv(k), но не и техните бъдещи стойности, действието на ОПР е идентично с това на класическия компенсатор с пренасочване [4,7].

Управление на емисиите на азотни оксиди (NO_X) в електроцентрала с комбиниран цикъл

На *фиг. 2* е представена принципна схема на топлоелектрическа централа, използваща природен газ, с комбиниран парогазов цикъл, която се състои от газова турбина, парогенератор за възстановяване на топлина и парна турбина (не е показана на схемата).

Газовата турбина (ГТ) има следния принцип на работа [8]: атмосферният въздух се сгъстява от компресора на ГТ и преминава през горивната й камера, където се смесва с нагнетения газ. Получава се горивна смес, която се запалва. Образуваните продукти при горенето се разширяват и завъртат вала на турбината. Механичната енергия на вала се придава на електрически генератор.

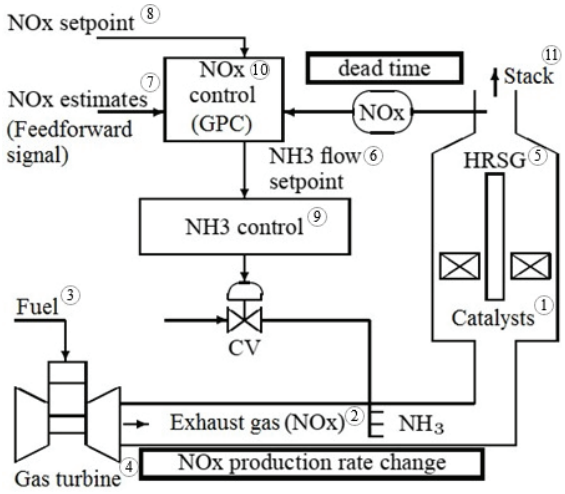
В отработените при процеса на горене газове се съдържат NOx, предимно азотен моноксид (NO), които трябва да бъдат обработени, преди да бъдат освободени в атмосферата. Извършва се селективна каталитична редукция (СКР) на NOx. Процес под действието на катализатор(и), при който в потока отработени газове се впръсква амоняк (NH_3). В резултат на взаимодействието между NOx и NH_3се получава азот (N_2) и вода (H_2O) съгласно 4 NO + 4 NH_3 + O_2 = 4 N_2 + 6 H_2O. Това отношение е реакция с равен брой молове, но остава известно количество нереагирали газове NOx и NH_3, които се отделят от катализатор(а/ите), тъй като реакцията на NOx и NH_3 зависи от работните условия. Процесът на разлагане на NOx е нелинеен и се характеризира с голямо времезакъснение, което се дължи на:

- времето за пренос на NH_3 до катализатор(а/ите);
- системата за анализ на газа.

На изхода на HRSG се извършва пробовземане от отработените газове. Пробата се транспортира до газовия анализатор, част от системата за анализ. Измерва се концентрацията на NOx.

Дебитът на гориво в горивната камера на ГТ се променя често в зависимост от потреблението на електрическа енергия в електроенергийната система. Следователно и количеството на NOx, генерирано от ГТ, се променя в зависимост от работата на турбината. Необходимо е да се предотвратят излишните емисии на NOx в околната среда при промяна на натоварването. Емисиите на NOx могат да бъдат намалени чрез увеличаване на впръскването на NH_3, но в същото време се увеличават и количествата на нереагиралия NH_3, както и разходите за потреблението му. СКР на NOx изисква прецизно управление на скоростта на впръскване на NH_3, за да се поддържа реакцията на NOx и NH_3 при подходящи работни условия. Регулаторът (GPC) за управление на процеса

на разлагане на NOx задава стойността на количеството NH_3, което трябва да се впръска в потока отработени газове, за да се поддържа зададената стойност на емисиите на NOx. Дебитът на NH_3 се регулира с клапан (CV).



Фиг. 2. Система за управление на емисиите на NOx в електроцентрала с комбиниран цикъл, адаптирана от [8]: 1 – катализатори; 2 – NOx в отработените газове; 3 – гориво (природен газ); 4 – газова турбина; 5 – парогенератор за възстановяване на топлина; 6 – зададена стойност на дебита на амоняка (NH_3) ; 7 – оценени стойности на емисиите на NOx; 8 – зададена стойност на емисиите на NOx; 9, 10 – управление на NH_3, NOx ; 11 – комин (изпускателен).

Симулационни изследвания

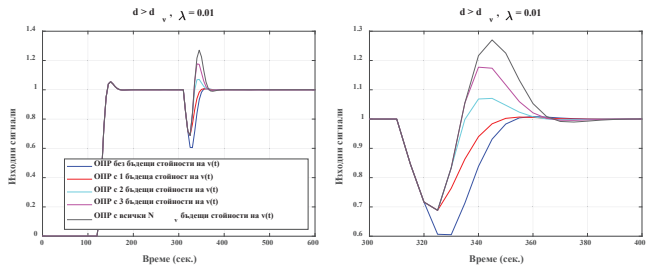
В средата на MatLab/ Simulink се изследва качеството на СУ на емисиите на NOx в електроцентрала с комбиниран цикъл с/със: компенсатор с включени бъдещи стойности на смущението към ОПР, структура с описание (8); компенсатор без включени бъдещи стойности на смущението към ОПР, в (8) $Q_f(q^{-1}) = 0$; стандартен ОПР, при който $Q(q^{-1}) = 0$. За топлоелектрическа централа с номинална мощност 165 MW [8] представят процеса на разлагане на NOx с линеаризиран модел, за който u е дебитът на впръскване на NH_3, а v – дебитът на NOx в отработените газове от ГТ. Линеаризираният модел се представя със следните предавателни функции:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{(30s+1)(5s+1)} e^{-120s}, \quad \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{1}{(30s+1)} e^{-110s}.$$

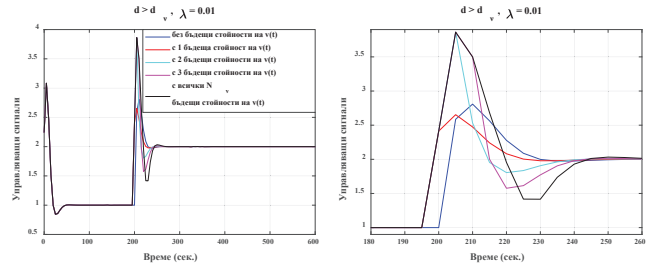
За да бъде получен необходимият за целите на симулационните изследвания разширен ARIMAX модел с описание (1) с избран такт на дискретизация $T_s = 5$ секунди, непрекъснатите предавателни функции се дискретизират и се оценяват параметрите на ARMAX/ARX модели за получените дискретни модели. Необходимо е още да се изберат настройваемите параметри на регулатора: $n_{e_1} = 2$, $n_{e_2} = 6$, $N_1 = 27$, $N_2 = 31$, $N_u = 7$. Те са избрани според правилата:

$$N_1 = d+1+n_{e_1}, \quad n_{e_1} \geq 0, \quad N_2 = d+1+n_{e_2}, \quad n_{e_2} \geq n_{e_1},$$
$$n_{e_1}+1 \leq N_u \leq n_{e_2}+1, \; N_v \leq N_u \; [9].$$

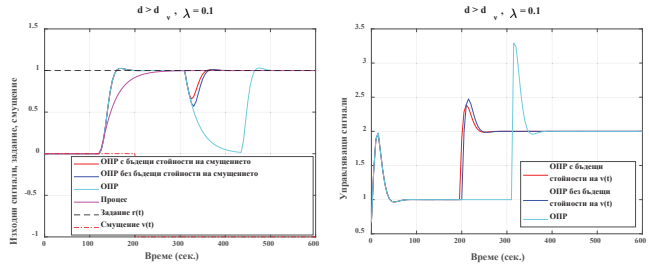
При $\lambda = 0.01$ е изследвано поведението на СУ с компенсатор с включен различен брой бъдещи стойности на смущението, който съответства на дължината на N_v. Получените сигнали в СУ при отработване на единично стъпално задание и приложено в 200-та секунда 100% товарно смущение са показани на *фиг. 3* и *4*. На същите фигури са показани и сигналите в СУ, получени с компенсатор без включени бъдещи стойности на смущението (в синьо). За N_v са избрани следните стойности: $N_v = 1$ (в червено), $N_v = 2$ (в синьо-зелено), $N_v = 3$ (в розово) и $N_v = N_u = 7$ (в черно), като те отговарят на условието $N_v \leq N_u$. От двете фигури се вижда най-доброто поведение на СУ с компенсатор с включена една бъдеща стойност на смущението ($N_v = 1$).



Фиг. 3. Изходни сигнали в СУ

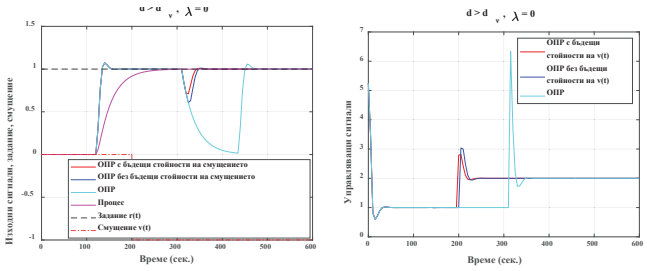


Фиг. 4. Управляващи сигнали в СУ



(а) Изходни **(б)** Управляващи

Фиг. 5. Сигнали в СУ



(а) Изходни **(б)** Управляващи

Фиг. 6. Сигнали в СУ

От изложения по-горе теоретичен анализ на структурата на ОПР може да се каже, че изборът на тегловния параметър λ е определящ за отработването на товарните смущения. Изследвано е неговото влияние. На *фиг. 5* и *6* са показани сигналите в СУ, получени: с включена една бъдеща стойност на смущението към ОПР (в червено); без включени бъдещи стойности на смущението към ОПР (в синьо); стандартен ОПР (в синьо-зелено) за $\lambda = 0.1$ и $\lambda = 0$.

Заключение

Изследвана е възможността на ОПР да се справи с отработването на товарни смущения при обект със закъснение, като $d > d_v$. Сравняват се сигналите в СУ, получени с различни структури на ОПР. В резултат на извършените изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Структурата на ОПР с включени бъдещи стойности на смущението стойност на $N_v = 1$ осигурява робастност на СУ и качествено отработване на смущението.
2. Стандартният ОПР се справя трудно и с цената на агресивен управляващ сигнал с отработването на смущението.
3. С разширяване на ARIMAX модела и закона за ОПУ се осигурява ефективно управление. Постига се адекватно отработване на смущението, дори когато структурата на компенсатор с пренасочване не е реализуема поради невъзможността за инверсия на закъснението.
4. Пълно компенсиране на смущението не се постига. То е възможно само когато $\lambda = 0$ и бъдещите стойности на смущението са включени в структурата на ОПР, но е съпроводено със силната чувствителност към неопределеността в модела на обекта и високочестотните шумове, следствие на широката честотна лента в контура на обратната връзка.

Литература

1. Guzmán, J., T. Hägglund. Simple Tuning Rules for Feedforward Compensators. – *Journal of Process Control*, 21, January 2011, No. 1, 92-102.

2. Pawłowski, A., C. Rodríguez, J. Guzmán, M. Berenguel, S. Dormido. Measurable Disturbances Compensation: Analysis and Tuning of Feedforward Techniques for Dead-Time Processes. – *Processes,* 4, June 2016, No. 2, 20.

3. Veronesi, M., J. Guzmán, A. Visioli, T. Hägglund. Closed-Loop Tuning Rules for Feedforward Compensator Gains. – *IFAC-PapersOnLine*, 50, July 2017, No. 1, 7523-7528.

4. Pawłowski, A., C. Rodríguez, J. Guzmán, M. Berenguel. Predictive Feedforward Compensator for Dead-Time Processes. – *IFAC-PapersOnLine*, 50, July 2017, No. 1, 1239-1244.

5. Руйкова, В. Обобщено предсказващо управление с компенсация на смущения за процеси със закъснение. – *Автоматика и информатика*, 2022, № 2, 6-11.

6. Rodríguez, F., M. Berenguel, J. Guzmán, A. Ramírez-Arias. Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

7. Pawlowski, A., J. L. Guzmán, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel. Improving Feedforward Disturbance Compensation Capabilities in Generalized Predictive Control. – *Journal of Process Control*, 22, March 2012, No. 3, 527–539.

8. Nakamoto, M., K. Shimizu, T. Kokubo. T-dof Generalized Predictive Control and an Application for a Large Dead Time Process of a Thermal Power Plant. 1[5th] IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 21-26 July 2002, 191-196.

9. Bao-Cang, D. Modern Predictive Control. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

За контакти:
Д-р инж. **Величка Руйкова**
Технически университет – София
velichka.ruykova@tu-sofia.bg