

РЕГУЛАТОРИ ЗА АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА
ИНДУСТРИАЛНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

Тодор Неделчев

Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, Габрово, Република България,
Кореспондиращ автор: todnedh@abv.bg

REGULATORS FOR AUTOMATIC CONTROL OF INDUSTRIAL
ELECTRICAL DRIVES

Todor Nedelchev

Technical University of Gabrovo, Hadji Dimitar str. 4, Gabrovo, Republic of Bulgaria,
Corresponding author: todnedh@abv.bg

Abstract

The report presents the regulators of industrial electric drives designed to automatically maintain a predetermined state of the technological process expressed by the set value of the controlled parameter. The most common PID regulators are considered. Alternative PID controllers are presented: on-off control, Fuzzy Logic Control, Model predictive control, Linear-quadratic-Gaussian, Particle Swarm Optimization.

Keywords: PID control, FLC-Fuzzy Logic Control, MPC-Model predictive control, Linear-quadratic-Gaussian (LQG) control, Particle Swarm Optimization (PSO).

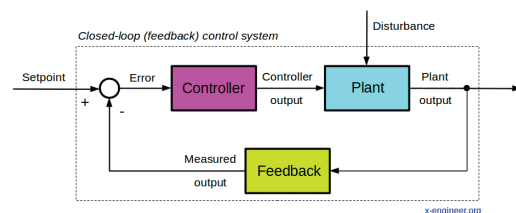
ВЪВЕДЕНИЕ

С настъпване на индустриалната революция се появява и огромната Particle Swarm Optimization (PSO) необходимост от автоматично регулиране на производствените процеси и в частност задвижванията.

Основна цел на регулаторите за автоматично управление е да поддържат предварително определено състояние на технологичния процес, изразено чрез зададената стойност на управлявания параметър (параметри). Според закона за управление, регулаторите са от тип с непрекъснат закон на управление, импулсни или релейни. В преобладаващите случаи регулаторите за автоматично управление (РАУ) са системи с обратна връзка и управляващият сигнал е пропорционален на грешката, т.е на разликата между зададената и действителната стойност.

Разликата между зададената и действителната стойност възниква в резултат от смущенията и специфичните особености на регулирания процес. Ролята на

РАУ е да елиминира тези смущения и да поддържа необходимата зададена стойност. Начините по които регулаторът реагира се наричат закони за управление.



Фиг. 1. Блокова схема на РАУ

Първите регулатори са механични с типичен представител центробежния регулатор за парни машини разработен от Джеймс Уат края на 18 и началото на 19 в.

През същия период се развиват редица нови инженерни системи като електродвигатели, хидравлични, пневматични и електронни усилватели.

Голямо предизвикателство се явява управление на корабите, а по късно и на самолетите.

В началото на 20 век са изобретени ПИД (Пропорционално - Интегрално-Диференциални) регулаторите. Няма регистриран патент или изобретател на първия ПИД регулатор. Тогава са се разграничавали в отделни устройства. Затова инженерите са им давали различни имена. Например устройството за автоматично поддържане на курса, използвано на корабите, се нарича „автоматичен кормчия“. Най-зрелищната демонстрация на ПИД регулатор е представянето на автопилота на самолета [1]. На 18 юни 1914 г. на изложение във Франция двама пилоти са се качили на крилата на самолета си във въздуха, за да покажат, че самолетът може да лети без ръчно управление.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Първото теоретично обосноваване на съвременното ПИД регулиране е направил Николас Минорски 1922 г. в публикацията „Устойчивост на насочването на автоматично управляеми обекти“ [2]. Тази статия бележи началото на едновременни практически реализации, теоретични изследвания и инженерни иновации, които доведоха до едно забележително постижение – понастоящем над 95% от базовите управляващи контури на индустриалната автоматика са с ПИД регулатори в автономно, централизирано или децентрализирано изпълнение.

ПИД регулаторът работи по алгоритъм, който следи отклонението от зададената стойност на управлявания параметър получено в момента на отчитане текущата променлива процеса (грешката), натрупваните грешки за последния наблюдаван период и величината на сигнала за грешка. На тази основа се определя не само величината на въздействието (регулируещия сигнал), но и за колко време ще действа. В алгоритъма участват и коефициенти за трите компонента, които отразяват специфичността на процеса и ползваната апаратура.

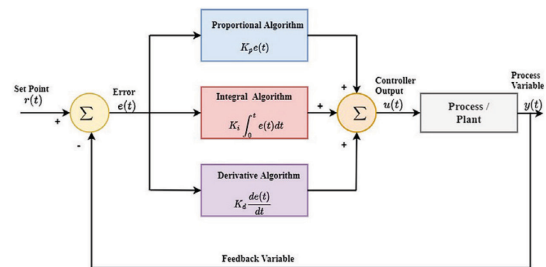
Пропорционалният регулатор умножава грешката с коефициент пропорцио-

нален на отклонението, за да изчисли своя следващ управляващ сигнал.

При прецизиране работата на пропорционалния регулатор се стига до извода, че грешката би могла да бъде сведена до нула чрез автоматично установяване заданието на управляващия сигнал на изкуствено по-висока стойност. Така се стига до идеята към пропорционалната част да се добавя предишната грешка или сума от грешките, с което се постига едно изпреварващо коригиране на регулиращия сигнал. Това е математически идентично с интегрирането на грешката и добавяне на натрупаната сума към пропорционалната част на изхода на регулатора. В резултатът се получава пропорционално-интегрален (ПИ) регулатор. Той продължава да генерира непрекъснато регулиращ сигнал, докато грешката не бъде сведена до нула.

Диференциалната част на регулаторът реагира на скорост на изменение на грешката. Намалената скорост на въздействие, осигурена от диференциалната част, намалява вероятността от пререгулиране.

Блоквата схема на ПИД регулатора е представена на фиг. 2.



Фиг. 2. ПИД регулатор блокова схема

За да изчисли големината на управляващият сигнал, ПИД алгоритъмът използва три управляващи члена – пропорционален, интегрален и диференциален. Всеки компонент се умножава по усилването, което се използва за коригиране на теглото на съответния член в уравнението. По този начин може да се настрои ПИД регулатора, за да управлява на определен процес.

Математическият израз на управляващия сигнал е:

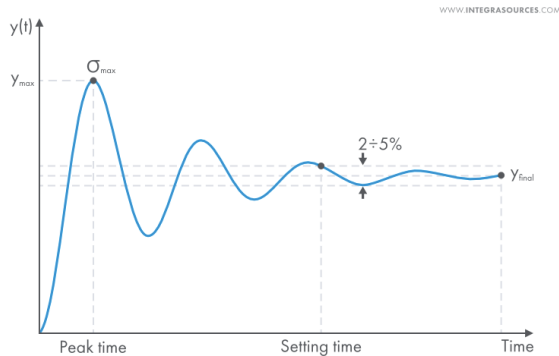
$$y(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$$e(t) = SP(t) - PV(t), \quad (2)$$

където: $SP(t)$ е зададената стойност за управление на процеса, $PV(t)$ е действителната стойност т.е. $e(t)$ е грешката при управлението [5].

За определяне на ефективността на регулатора са въведени критерии характеризиращи преходния процес (фиг. 3.):

- време за установяване - времето за което управляващият сигнал се променя в малки граници $y(f) \pm (2 \div 3)\%$ и променливата на процеса е в стабилно състояние;



Фиг. 3. Характеристика на преходния процес

- управляващ сигнал $y(t)$ с който се управлява процеса;

- пререгулиране σ е процентното съотношение на максималното отклонение на управляващия сигнал (Δy_{max}) към нейната стационарна стойност $y(f)$ в посока, обратна на първоначалното ѝ отклонение.

$$\sigma_{max} = \frac{y_{max} - y_f}{y_f} 100 = \frac{\Delta y_{max}}{y_f} 100 \quad [\%] \quad (3)$$

- стационарна грешка е разликата между желаната стойност на процеса (зададена точка) и действителната променлива на процеса, след като се стабилизира [6].

Най-често използваните структури за ПИД регулатори са паралелни и последователни (сериен тип):

- *Паралелен тип*: В тази структура, пропорционалната П, интегралната И и диференциалната Д части възникват в отделни членове на уравнението, и с комбинирания им ефект се получава сумата. В този тип всеки параметър е независим от другите и съответният регулиращ закон е представен като [4]:

$$y(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

където: пропорционалното усилване е $K_p = K_c$, интегрално време е T_i и $k_i = \frac{K_c}{T_i}$, диференциалното време е T_d и $k_d = K_c T_d$.

- *Сериен тип*: Сериен или интерактивно уравнение произлиза главно от характеристиките на аналоговата електронна верига. Точно като идеално ПИД уравнение промяната в K_c въздейства върху всичките три действия, но както производните, така и интегралните константи оказват влияние върху пропорционалното действие. Този тип има следния закон за управление:

$$e_1(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

$$w(t) = K_c \left(e_1(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right)$$

В зависимост от конкретния регулиран обект се задава нула на пропорционалния, интегралния или диференциалния коефициент усилване, за да се елиминира съответния член от уравнението. Тези типове ПИД регулатори са известни като модифицирани (таблица 1).

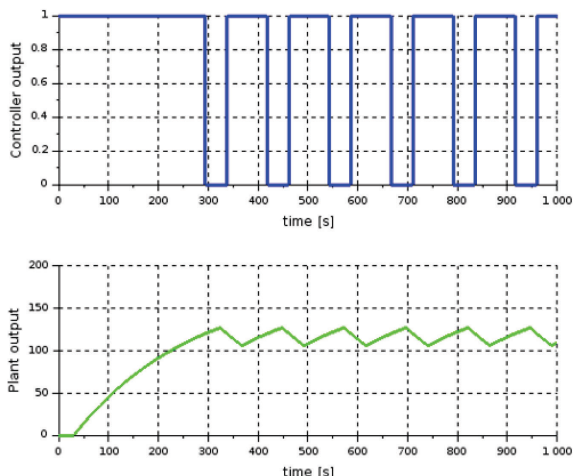
Таблица 1

	П	И	Д
ПИД регулатор	+	+	+
П регулатор	+	-	-
И регулатор	-	+	-
Д регулатор	-	-	+
ПИ регулатор	+	+	-
ПД регулатор	+	-	+

Алтернативни ПИД регулатори

РАУ с включено и изключено състояние (on-off control)

Този вид регулатори поддържат само две състояния на управляващия изход – включено (1) когато управляваната променлива не е достигнала зададената стойност (грешката е положителна) и изключено (0) когато грешката е нула или отрицателна – фиг. 4. Регулаторите са евтини и с ниско ниво на сложност, но предлагат ниска точност. Те често не могат да поддържат променливата на процеса на определено ниво поради инерция. Параметърът ще варира над и под зададената точка през цялото време. Подходящи за системи, където не се изисква прецизен контрол.



Фиг. 4. РАУ включено изключено

В повечето регулатори с обратна връзка, системата не може да реагира мигновено на смущение и отнема време докато започне промяна на контролирания параметър. Това закъснение е известно като мъртво време.

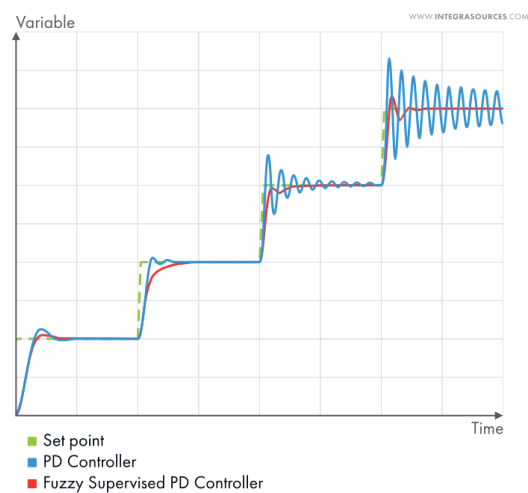
РАУ с размита логика

Управлението с размита логика (Fuzzy logic control FLC) [3] е компютърна цифрова технология, състояща се от теория на размитите множества, размити езикови променливи и размита логика.

Терминът размита логика води началото си от работата и теорията, развита от Лотфи Заде.[6] През 1965 г. той предлага теорията на размитите множества и по-

късно установява размитата логика на базата на тази теория.

Системата за развито управление е базирана на размита логика, математическа система, която анализира аналогови входни стойности по отношение на логически променливи, приемащи непрекъснати стойности между 0 и 1, за разлика от класическата цифрова логика, която работи с дискретни стойности на 1 или 0 (съответно вярно или невярно) – фиг. 5.



Фиг. 5. РАУ с размита логика

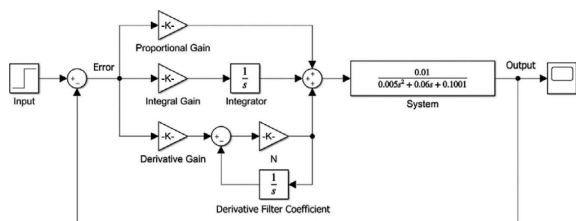
На практика повечето регулатори за автоматично управление с размита логика са ПИД регулатори, модифицирани с размита логика, за да планират усилването. Променливите усилвания работят по-добре за нелинейни процеси. Това решение е подходящо за сложни системи, които имат много несигурност или променливост.

Приложението на FLC се простира от контрол на промишлени процеси до биомедицински инструменти и ценни книжа. В сравнение с конвенционалните системи за управление, РАУ с размита логика се използва основно при сложни недобре дефинирани процеси.

Едно от приложенията на РАУ с ПИД регулатори е свързано с процесите при системите за електрозадвижване. Постояннотоковите (DC) двигатели имат много добри характеристики при работа с различни скорости, достъпно и лесно управление. За това тези двигателите имат

много голямо приложение в инструментални машини, роботизирани системи и много машини в текстилната промишленост. За автоматичното им управление се използват основно ПИД регулатори.

Широкото използване на ПИД регулаторите за управление на DC двигатели довежда до необходимост от прецизна настройка при сложни технологични процеси. Алгоритъмът за оптимизиране на обработката на множество от действителни и очаквани състояния на управлявания процес Particle Swarm Optimization (PSO) е предложен от Kennedy и Eberhart през 1995 г. [7]. Всеки от коефициентите на ПИД регулатора достига оптимална стойност с използване ефекта на груповата памет. Блоквата схема на ПИД регулатор с PSO оптимизация е показана на фиг. 6.



Фиг. 6. ПИД регулатор за DC двигател с PSO

Необходимо е първо да се получи, предавателна функция на DC двигателя с която се управлява ПИД регулатора, чиито параметри са оптимизирани с PSO алгоритъм. Много добър ефект върху процеса има промяна на стойността на коефициента N противошумовия филтър.

В PSO алгоритъма началните коефициенти на ПИД регулатора са генерирани произволно в съответното с управлявания процес пространство, като най-често началните скорости се приемат за нула. След това се изчисляват стойности на годност на произволно генерирани позиции използвайки целевата функция на процеса. Необходимите скорости за регулирания процес се актуализират с мощта на тези позиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Най-широко приложение при изграждане на регулатори за автоматично управление на постоянноходкови двигатели, безчеткови двигатели, стъпкови двигатели и серво двигатели намират ПИД регулаторите. Това е затворена система с обратна връзка, която може да управлява системата въз основа на измерването на променливата на технологичния процес.

ПИД регулаторите намират основно приложение управление в: производството; химическата и фармацевтична промишленост; авиационна промишленост; роботика; преобразуватели на мощност; фотоволтаични системи.

Основни предимства на ПИД регулаторите са:

- осигуряване на по-голяма точност от по-простите регулатори без обратна връзка;

- енергийно по-ефективен;

- не изисква тежък хардуер, така че устройствата са предимно евтини;

- може да бъде реализиран като аналогова електроника, цифрова електроника и механични решения;

- компонентите на регулатора (коефициентите на отделните съставлящи) П, И и Д могат да се настройват интуитивно, чрез проба и грешка;

- удължава живота на задвижващите устройства;

- реагира на неизмерени смущения по-добре поради наличието на пропорционални и производни компоненти.

Ситуации, при които ПИД регулатора не е най-добрият избор:

- ако не е настроен правилно, може да направи системата нестабилна и дори да я повреди;

- усилва високочестотния шумов компонент на сигнала за грешка на управлявания изход, което дестабилизира системата

- не се справят добре при управление на повече от един параметър.

Оптималните ПИД регулатори включват широк спектър от типове: размита логика (FLC), моделно предсказуемо управление (MPC), линейно-квадратично-гаусови (LQG), Н-безкрайни контролери, PSO оптимизация и много нелинейни оптимални контролери, включително контролери за плъзгащ се режим според някои специалисти.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hadjiski M., S. Koynov 100 Years of Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller, Automation and informatics, pp. 5-11, 3/2022.
- [2] Minorsky N., Directional Stability of Automatically Steered Bodies. Journal of the American Society of Naval Engineers, 34, 1922, No. 2, 280-309.
- [3] Hu, B., G. K. I. Mann, R. G. Gosine. New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers, IEE Transaction on Fuzzy Systems, vol. 7, №5, 1999, pp. 512-539.
- [4] Zhuang, M., D. P. Atherton Automatic tuning of optimum PID controllers, Proceedings of Inst. Elect Eng.-Control Theory Appl., vol. 140, 1993, pp. 216-223.
- [5] Rakesh P., Borase D., K. Maghade, S. Y. Sondkar, S. N. Pawar, A review of PID control, tuning methods and applications, International Journal of Dynamics and Control, <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>
- [6] Yuldashev T., A. Solovev, Mathematical Representations of PID Controller Gains, <https://www.integrasources.com/blog/pid-controller-gains-mathematical-representations/>
- [7] Yıldırım S., M. Bingol, Tuning PID controller parameters of the DC motor with PSO algorithm, International Review of Applied Sciences and Engineering, 13.12.2023.