
Arbitražinis reguliavimo algoritmas

**Tomas Burba,
Arūnas Dargis,
Eligijus Sakalauskas**

*Architektūros ir statybos institutas,
Energetinių sistemų automatizavimo
sektorius,
Tunelio g. 60, LT-3036 Kaunas*

Pasiūlytas arbitražinis reguliavimo algoritmas, kuris gali pakeisti sistemos modelių pagrįstus reguliavimo metodus ir kurio tikslumas artimas šiais metodais pasiekiamam reguliavimo tikslumui. Sistemos modelių pagrįsti reguliavimo metodai reikalauja daug skaičiavimo išteklių ir sunkiai realizuojami mikroprocesorinėse sistemose. Todėl praktikoje taikomi neparimetriniai reguliavimo metodai, apibendrintai vadinami PID reguliatoriais, kurie remiasi reguliavimu pagal sistemos paklaidą, jos integralu ir diferencialu. Arbitražinis reguliavimo algoritmas leidžia padidinti reguliavimo kokybę, palyginti su standartiniais reguliavimo algoritmais, ypač nestacionariose reguliuojamose sistemose. Algoritmas realizuojamas, stabilizavus reguliavimo operatorių ir nustatčius sprendžiamąsias taisykles, pagal kurias realiu laiku parenkami standartiniai reguliavimo algoritmai.

Raktažodžiai: reguliavimo sistema, arbitražinis reguliavimo algoritmas, PID reguliatorius

1. ĮVADAS

Norint pasiekti aukštesnę reguliavimo kokybę, tenka taikyti reguliavimo metodus, paremtus sistemos modelių. Kadangi sistemos modelis yra žinomas tiksliai labai retais atvejais, jis gali būti nustatytas panaudojant sistemų identifikacijos metodus: parametrinius ir neparimetrinius. Taikant parametrinius identifikacijos metodus dažniausiai nustatomas sistemos modelis, numatytas diferencine lygtimi ar jų sistema, ir identifikacijos proceso metu yra gaunami tų diferencinių lygčių parametrai. Neparimetriniai metodai leidžia nustatyti sistemos svorinę funkciją arba koreliacines funkcijas. Abiem atvejais yra reikalingas sistemos sužadinimas ir sistemos įėjimų bei išėjimų matavimai. Tačiau šių metodų realizavimas reikalauja daug skaičiavimo išteklių ir yra sunkiai realizuojami mikroprocesorinėse sistemose.

Todėl praktikoje plačiai taikomi reguliavimo sistemos modelių neparemti metodai – tai neparimetriniai reguliavimo metodai, apibendrintai vadinami PID reguliatoriais (Proporcinis, Integralinis, Diferencialinis) [1]. Šie reguliatoriai remiasi reguliavimu pagal sistemos paklaidą, jos integralu ir diferencialu.

2. ARBITRAŽINIO REGULIAVIMO ALGORITMAS

Panagrinėkime abstrakčią sistemą, numatytą rinkiniu $\{x, y, q\}$:

čia x – sistemos įėjimų vektorius; y – sistemos išėjimų vektorius; q – sistemos būseną.

Ryšys tarp x, y, q nustatomas operatorinėmis lygtimis

$$y = Ax, \quad (2.1)$$

$$y = Bq. \quad (2.2)$$

Arbitražinio reguliavimo algoritmo realizacijai reikia apibrėžti sistemos būsenos stebimumo sąlygą [2]. Sistema vadinama stebima, jeigu egzistuoja toks B^{-1} , kad $B^{-1}B = I$, kai I – tapatumo operatorius ir

$$q = B^{-1}y. \quad (2.3)$$

Paskutinė sąlyga retai kada realizuojama praktikoje, nes realios sistemos iš esmės yra stochastinės, operatorius B žinomas nevisiškai ir dažnai yra išsigimęs, t. y. turi nenulinį branduolio poerdvį. Ryšium su tuo vietoje determinuoto B dažniausiai turime jo įvertį \hat{B} , o vietoje B^{-1} – pseudoatvirkštinių operatorių B' [3].

Kadangi \hat{B} ir B' suradimas taip pat reikalauja daug skaičiavimo išteklių, tikslinga būsenos vektorių susiaurinti iki tokio poerdvio $b \subset q$, kad B būtų neišsigimęs ir turėtų raiškų atvirkštinių operatorių B' . Šios sąlygos yra nesunkiai pasiekiamos, tačiau operatoriaus B' stabilumo sąskaita. Kitaip tariant, jeigu kai $\varepsilon > 0$,

$$\|b_1 - b_2\| \leq \varepsilon < \infty, \quad (2.4)$$

tai dar nereiškia, kad

$$\|B'y_1 - B'y_2\| \leq \eta < \infty, \quad (2.5)$$

kai $\|\cdot\|$ yra vektorinės erdvės norma.

Kadangi operatoriaus B' stabilizacija ir reguliari- zacija bendru atveju yra gana sudėtingas uždavinys, jo neišsprendus, reguliavimo algoritmas gali tapti nestabiliu.

Nestabilumas gali sukelti dideles nerealizuojamas sistemos poveikio reikšmes arba sukelti sistemos ir regulatoriaus generacijos procesą.

Atliekant kompiuterinius skaičiavimus su diskre- tiniais skaičiais, praktikoje visada galioja, kad $\eta < \infty$, tačiau šiuo atveju $\|B'y_1\| \leq \eta_D < \infty$, kai η_D – tai maksimalus diskretinis skaičius, pavaizduojamas skai- čiavimo įrenginyje. Kadangi η_D pakankamai didelis skaičius, kuris 8 bitų mikroprocesoriuose gali siekti 2^8 , tai apskaičiuota reikšmė $\|B'y\|$ gali būti laikoma skaitmeniškai nestabilia, nors ir baigtine [4].

Siūloma regularizaciją atlikti pasitelkus arbitra- žinį algoritmą. Įvedamas arbitražinis algoritmas, pa- grįstas regularizacijos operatoriumi R , kuris tenkina sąlygas

$$\|b_1 - b_2\| \leq \varepsilon < \infty \Rightarrow \|RB'y_1 - RB'y_2\| \leq \eta < \infty. \quad (2.6)$$

Tegul sistemos būsenų erdvė Q_b yra pilnos baig- tinės sistemos būsenų erdvės Q poaibis, t. y. $Q_b \subset Q$ ir $b \notin Q_b$. Suskaidykim erdvę Q_b į aibę apręztų nes- susikertančių poerdvių arba sričių $\{Q_{bi}\}_1^n$, tokių, kad $\forall b_1, b_2 \in Q_{bi}$ galioja sąlyga (2.4).

Arbitražinio algoritmo realizavimas susideda iš dviejų sudėtinių dalių. Tai operatoriaus B' stabiliza- cija ir sprendžiamųjų taisyklių nustatymas standarti- niams reguliavimo algoritmams parinkti.

Operatoriaus B' stabilizacija atliekama taip. Iš sis- temos išėjimo vektoriaus y apskaičiuojamas $B'y$ ir tikrinama sąlyga, ar $B'y \in \{Q_{bi}\}_1^n$. Jeigu E!m, kad $B'y \in Q_{bm}$, tada veikia sprendžiamųjų taisyklių nu- statymo algoritmas. Jeigu ne, parenkamas toks $R_m \in \{R_i\}_1^n$, kad $R_m B'y \in Q_{bm}$ ir tuo būdu bet kuriems $R_m B'y_1$ ir $R_m B'y_2$ galioja (2.6). Be to, R_m tenkina sąlygą

$$\|B'y - R_m B'y\| = \min_m, m = \overline{1, n}. \quad (2.7)$$

Kadangi, kaip minėta anksčiau, $\|B'y\| \leq \eta_D < \infty$, t. y. baigtinis skaičius diskretinėje formoje, minimi- zacijos procedūrą (2.7) galima atlikti perrinkimo bū- du, nes praktikoje poerdvių skaičius Q_{bi} nėra didelis. Tokiu būdu (2.7) procedūra nustato vienintelį op-

timalų poerdvį Q_{bm} , tačiau nevienintelį elementą $R_m B'y \in Q_{bm}$. Realizuojant standartinį reguliavimo algoritmą, reikia turėti vienintelį elementą $R_m B'y$. Tam galima panaudoti projekcinį operatorių P_m , to- kį, kad

$$\|B'y - P_m B'y\| = \min_{y \in Q_{bm}}, \quad (2.8)$$

kai P_m yra elemento $B'y$ projekcija į poerdvį Q_{bm} . Tokiu būdu gaunama optimali būsenos elemento reikšmė (įvertis)

$$q_{0m} = P_m B'y_0 = \min_{y \in Q_{bm}} \|B'y - P_m B'y\|, \quad (2.9)$$

kuris gali būti naudojamas standartiniam algoritmui realizuoti.

Sprendžiamųjų taisyklių nustatymas vykdomas taip. Kiekvienam poerdviui Q_{bi} yra priskiriamas at- skiras standartinis reguliavimo algoritmas. Nustačius Q_{bm} , atliekamas algoritmas r_m . Atliekant matavimus realiame laike, apskaičiuojami nauji $B'y$, randamas naujas R_k ir sprendžiamosios taisyklės yra peržiūri- mos. Tokiu būdu naudojami standartiniai algoritmai arbitražinio algoritmo dėka yra konkuruojantys, nes vykdomas standartinis algoritmas gali būti nutrau- kiamas, jeigu kitu laiko momentu R_k netapatus R_m .

3. STANDARTINIO ALGORITMO REALIZAVIMAS

Nagrinėsime standartinius reguliavimo algoritmus, va- dinamus PID regulatoriais.

Bendru atveju tolydinis PID regulatorius apa- rašomas formule

$$r(t) = ae(t) + \frac{b}{T} \int_0^T e(t) dt + C \frac{de(t)}{dt}; \quad (3.1)$$

čia $r(t)$ – regulatoriaus poveikis sistemai tolydiniu- me laike t ; a – proporcinio regulatoriaus proporcin- gumo koeficientas, kuris gali būti kintamas laike; b – integralinio regulatoriaus koeficientas; T – integra- vimo laiko pastovioji; C – diferencialinio reguliato- riaus koeficientas.

Paklaida $e(t)$ būsenos erdvėje apskaičiuojama taip:

$$e(t) = q_e(t) - q_{0m}(t); \quad (3.2)$$

čia $q_e(t)$ – etaloninė sistemos būseną, kuri idealaus regulatoriaus atveju turi būti užtikrinta.

Atlikus (3.1), (3.2) lygčių diskretizaciją, gaunama diskretinės formos PID algoritmo realizacija.

Atlikus standartinius pertvarkymus [4], iš diskre- tinių PID regulatoriaus lygčių galima gauti reku- rentinį PID regulatoriaus algoritmą, kuriame regu-

liatoriaus poveikis r_{mk} k -uoju laiko momentu r_{mk} apskaičiuojamas taip:

$$r_{mk} = f_m(e_k, e_{k-1}, a, b, c, T), \quad (3.3)$$

kai f_m – tiesinė funkcija argumentų atžvilgiu.

Ši išraiška tinka labiau, nes diskretizuotas (3.1), (3.2) lygtis realizuoti skaičiavimo įrenginiu yra nepatogu, kadangi atmintyje reikia laikyti diskretinius būsenos matavimus integravimo periodu T .

4. IŠVADOS

Pasiūlytas arbitražinis reguliavimo algoritmas leidžia padidinti reguliavimo kokybę, palyginti su standartiniais PID reguliavimo algoritmais. Ypač sunku taisyti PID reguliatorius nestacionarioms reguliuojamoms sistemoms, tokioms kaip karšto vandens reguliavimo sistemoms. Dėl ryškaus nestacionarumo PID reguliatorius nesugeba užtikrinti netgi $\pm 5^\circ\text{C}$ tikslumo. Tuo tarpu siūlomas arbitražinis reguliavimo algoritmas užtikrina $\pm 3^\circ\text{C}$ reguliavimo tikslumą, reguliavimo parametrų suderinimą netgi „sunkiuose“ objektuose, kuriuose įvadinio termofikacinio vandens slėgių perkryčiai yra dideli arba pernelyg maži.

Gauta
2001 09 25

Literatūra

1. Åström K. J., Hägglund T. PID controllers: theory, design and tuning. 2nd ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park. North Carolina, 1995. 343 p.
2. Dargis A., Kruopis N., Ruseckas A. ir kt. Informacinių procesų valdymas energijos tiekimo sistemose // Energetika. 1999. Nr. 3. P. 38–43.
3. Korn G. A., Korn Th. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company. New York, 1968.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления / Пер. с англ. яз. Москва, 1984. С. 541.

Tomas Burba, Arūnas Dargis, Eligijus Sakalauskas

ARBITRATION ALGORITHM OF REGULATION

S u m m a r y

The arbitration algorithm of regulation is proposed that can replace common regulation techniques based on system model, almost without loss of regulation accuracy. These techniques require many computing resources and are difficult to develop in microprocessor systems. Therefore, nonparametric techniques generally called PID regulators and based on regulation error, its integral and differential, are used in practice. The arbitration algorithm of regulation allows to increase regulation quality in comparison with standard regulation algorithms, especially in case of nonstationary systems. To implement it, the operator of regulation must be stabilized and decision rules for choosing one of the standard regulation algorithms must be defined.

Key words: system of regulation, arbitration algorithm of regulation, PID regulator

Томас Бурба, Арунас Даргис, Элигиус Сакалаускас

АЛГОРИТМ АРБИТРАЖНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Р е з ю м е

Предложен алгоритм арбитражного регулирования, который может заменить методы регулирования на базе модели системы практически без потери точности регулирования. Методы регулирования на базе модели системы требуют больших вычислительных ресурсов и трудно реализуемы в микропроцессорных системах. Поэтому на практике применяются непараметрические методы регулирования, обобщенно называемые ПИД-регуляторами, которые опираются на ошибку регулирования системы, ее интеграле и дифференциале. Алгоритм арбитражного регулирования позволяет увеличить качество регулирования по сравнению со стандартными алгоритмами регулирования, особенно в нестационарных системах регулирования. Алгоритм реализуется путем стабилизации оператора регулирования и определения правил решения, по которым подбирают стандартные алгоритмы регулирования.

Ключевые слова: система регулирования, алгоритм арбитражного регулирования, ПИД-регулятор