

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ТЕХНИКИ ПРОТИВ ИНТЕГРАЛНО НАСИЩАНЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Георги Михалев¹, Станимир Йорданов²

¹Технически университет - Габрово

²Технически университет - Габрово

RESEARCH AND ANALYSIS OF ANTI-WINDUP TECHNIQUES IN THE CONTROL SYSTEMS

Georgi Mihalev¹, Stanimir Yordanov²

¹Technical University of Gabrovo

²Technical University of Gabrovo

Abstract

The paper presents some of the main anti-windup techniques and strategies in the control of technological plants. Detailed block diagrams of implemented anti-windup techniques are presented. Simulation schemes for PID control of a linear vibratory feeder have been performed. The obtained results are graphically displayed. An analysis and comparison on the basis of the quality of the received control is made.

Keywords: Integrator windup, Anti-windup techniques, PID control.

ВЪВЕДЕНИЕ

В последно време при управлението на технологични обекти, все повече внимание се обръща на реални обекти и изграждането на техни математични модели с цел синтез на подходящо управление. Тази тенденция води след нея си множество проблеми, решението на които може да се намери в различни аспекти на науката и техниката.

Такъв проблем е на например интегралното насищане в случаите, в които се използват регулатори, които имат интегрална съставяща. Такъв регулатор е например ПИД и неговите разновидности, който е и един от най-често използваните закони за регулиране. Явлението наричано интегрално насищане се свързва най-вече с нелинейни феномени и поради тази причина се използват множество техники за неговото изследване.

Проблемите с насищането на датират от 40-те години на миналия век, като тогава са се прилагали предимно индивидуални стратегии от различно естество[1]. Именно този

проблем се счита за причина за появяването на коригиращи звена в контура на управление с цел стабилизация. В следствие с навлизането на цифровите системи за управление, реализирането на различни други стратегии за справяне с т. нар. „windup“ проблем става по-лесно и започва по-усилено изследване на различни системни решения по отношение на производителността и стабилността на системите. С повишаването на сложността на използваните закони за управление и получаваните модели на различни обекти, стратегиите за справяне с интегралното насищане намират място в почти всички методи за синтез на управление и не са подценявани от изследователите в техните разработки.

Текущата статия има за цел да представи някои от актуалните и най-често използвани и реализирани техники за решаване на проблема с интегралното насищане. Представя се сравнение на някои от тях при използването на ПИД закон за управление, чрез ре-

лизирането им в симулационни схеми за управление на линеен вибрационен трансформатор.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Пропорционално-Интегралния-Диференциален (ПИД) закон за управление се използва широко за различни системи[2]. Често когато се разглеждат реални, физически реализуеми системи с тяхното управление, в контура на управление се отчита и изпълнителния механизъм (актуатор), които има за цел да задвижи дадената система, по начин определен от управляващото устройство (регулатора). Въпреки, че актуаторите често се избират с възможности по-големи от реално необходимите, често се налага управляващия сигнал да бъде ограничен. Това се налага например когато системата има голям набор от работни условия, и управлението лесно достига лимита на актуатора или например при често превключване между ръчно и автоматично управление.

Ограничаването на актуатора, на практика означава да се включи нелинеен елемент в контура на управление и един нормален линеен проблем при управлението да стане нелинеен. Ограничението води до акумулиране на огромна грешка от интегралната съставяща, което в последствие води по-голямо пререгулиране, по-дълъг преходен процес и понякога дори до неустойчивост на системата. В резултат от това може да се каже, че контура на обратната връзка е прекъснат и затворената система функционира като отворена, докато актуатора е ограничен, независимо от изхода на системата.

Изследването на този проблем е широко разпространено за различни обекти[3,4,5,6], като се предлагат и множество стратегии за решаването му. Основно те се делят на директни линейни техники против интегрално насищане (DLAW) и техники против интегрално насищане възстановяващи модела (MRAL).

Техниките против интегрално насищане от типа DLAW, са много видове и предлагат другите стратегии. Най-често използваните и значими методи против насищане от този тип са представени в [7,8,9,10,11].

Въпреки, че исторически MRAL методите и алгоритмите против интегралното насищане възникват по-късно, те бързо се обособяват като предпочитан вариант за реализация, и съответно са обект на множество изследвания [12,13,14,15,16,17,18,19]. Най-общо може да се каже, че те се базират на приета по-късно за основна стратегия, а именно - избор на анти-насищащ компенсатор. Този тип стратегии се отличават главно с две предимства:

- Регулаторът не е задължително да бъде линеен, т.е. MRAL схемите са независими по отношение на регулатора.
- Стабилизиращия сигнал може да се избере така, че да се позволи синтезът на нелинейни анти-насищащи закони, подходящи за решаване на по-сложни проблеми.

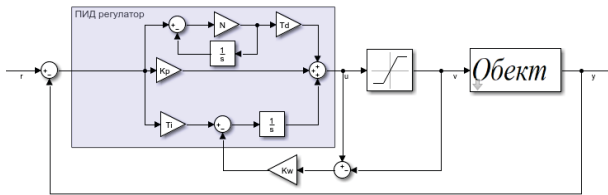
Съществуват и други видове анти-насищащи стратегии, като адаптивни[20], с преизчисляване на грешката[21], синтез чрез D-имплементация[19], робастен синтез [22,23], ПИД регулатори с две степени на свобода[24], базирани на предиктори[25], базирани на наблюдатели[26] и други, като те основно се базират на промяна на структурата на регулатора. В текущата статия ще се обърне внимание само на MRAL техниките, като по-широко застъпени в научно-техническите среди.

СТРАТЕГИИ ЗА ИНТЕГРАЛНО АНТИ-НАСИЩАНЕ

Част от споменатите по-горе типове техники за интегрално анти-насищане, са особено застъпени, както в практиката, така и в научните публикации по тематиката. Следва представяне на по-често използваните.

Обратно изчисление (Back calculation)

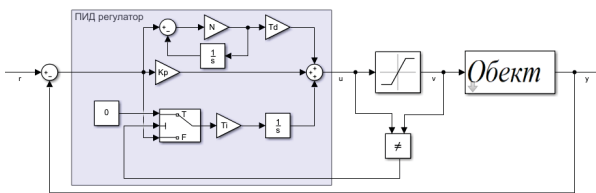
При този метод се използва допълнителна обратна връзка. Тази обратна връзка формира сигнал, който е претеглената разлика от изхода на регулатора и изхода на ограничението на актуатора. Схема на метода е представена на фиг. 1. Обикновено k_w избира да бъде $1/T_i$, където T_i е времеконстантата на интегралната съставяща на ПИД регулатора.



Фиг. 1. ПИД управление с ВС анти-насищане

Условно интегриране (Conditional integration, clamping method)

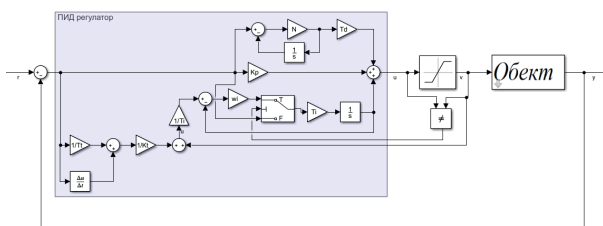
Идеята при метода на условно интегриране е сравнително елементарен. Състои се в следене кога ограничението ще доведе до акумулиране на голяма грешка, при което интегратора на ПИД регулатора се изключва. Поради лесния си принцип на работа този алгоритъм търпи и много модификации. Най-често се използва отново сравнение на сигнала преди ограничението и след него, като в момента при които е налице ограничаване на управляващия сигнал, интегратора на регулатора се изключва. Блок-схема на стратегия за анти-насищане с условно интегриране е показана на фиг. 2.



Фиг. 2. ПИД управление с CI анти-насищане

Интегрално прогнозиране на състоянието (Integral state prediction)

При този метод, когато регулатора работи в линейната част на ограничението (т.е. управляващия сигнал не е ограничен), грешката се подава на входа на интегратора, а когато управляващия сигнал е ограничен интегралното състояние се установява в прогнозирана стойност, получена от нискочестотен филтър с цел предотвратяване на промяна състоянието на интегратора. На фиг. 3 е представена блок-схема на метода.



Фиг. 3. ПИД управление с ISP анти-насищане

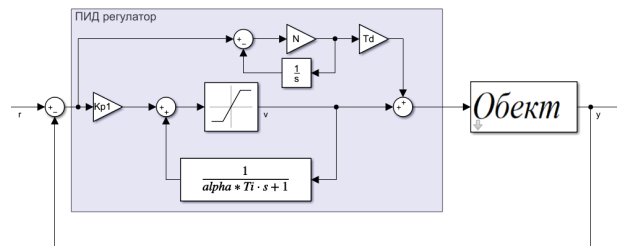
Стойността на състоянието на интегратора се определя от :

$$q_{ss} = \frac{1}{T_i} \left(\frac{1}{k_t} \left(\dot{e} + \frac{1}{\tau_m} e \right) + v \right). \quad (1)$$

Чрез правилен избор на ω_i се определя времето за установяване на интегратора в прогнозираното състояние. Времето за установяване трябва да се избере да бъде по-малко в сравнение с динамиката на управляваната система, тъй като в (1) участва производна на грешката, което ограничава нискочестотния филтър.

Автоматично нулиране (Automatic reset)

Реализирането на автоматичното нулиране на интегратора се осъществява, чрез използване на последователната форма на ПИД регулатора. При тази схема ПИ частта на регулатора се конфигурира така, че да се противодейства на ефекта на насищането. На входа на ПИ частта се подава сигнал от изхода на ограничението, като по този начин, когато изхода не е ограничен коеф. на усилване по пътя на предаване се запазва и предавателна функция на ПИ частта остава в общата предавателна функция на регулатора. На фиг. 4 е представена блок схема на метода.



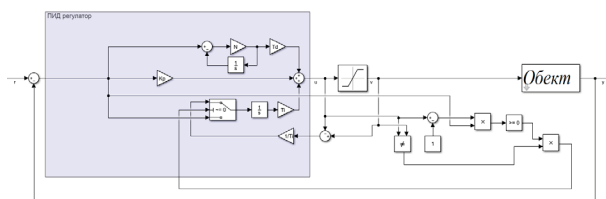
Фиг. 4. ПИД управление с AR анти-насищане

При реализирането на тази схема не може да се използва вече получена настройка на ПИД регулатора при паралелна форма. Схемата се характеризира със статична грешка, която се компенсира с промяна на коеф. на усилване.

ПИД регулатор с променлива структура (Variable structure PID)

При тази разновидност на ПИД регулатора, когато управляващия сигнал е ограничен, структурата на VSPID потиска интегратора, като така изхода на регулатора лежи на

ръба на ограничението. В структурата на регулатора се използва превключване между няколко различни ПИД регулатора с различни времеконстанти на интегриране за различните условия. Условието за превключване се получава с помощта на няколко логически функции. На фиг. 5 е представена блок-схемата на ПИД регулатора с променлива структура.



Фиг. 5. VSPID регулатор със схема за анти-насищане

При настройка на регулатора трябва да се избере такава константа $\alpha > 0$, че управляващия сигнал възможно най-бързо да се приближава до една от крайните стойности на ограничителния интервал.

Преизчисляване на грешката (Error recalculation)

При този метод, чрез използване на полиномна форма на регулатора в дискретен вид, управляващия сигнал може да се изчисли от две предходни стойности на управляващия сигнал, грешката и текущата стойност на грешката.

Ако текущата стойност управляващия сигнал е извън ограничението, стойността на текущата грешка трябва да се промени, така че управляващия сигнал да бъде равен на сигнала след ограничението.

При тази стратегия не се получава интегрално насищане, тъй като управляващия сигнал се променя винаги да бъде равен на сигнала на входа на обекта за управление, а грешката се променя така, че всичките и предишни стойности са последователни и изхода на регулатора се държи винаги в ограничението.

Диференциална имплементация (differential implementation)

В случаите когато интегратора е неразделна част от динамиката на регулатора, описаните по-горе анти-насищащи техники не могат да се реализират и справянето с

насищането става много по-трудно. Такива контролери са например всички базирани на наблюдатели, контролери с линейно изменение на параметри, оптимални регулатори и др.

При тези случаи обособяването на интеграторна динамика на изхода на регулатора, може да се реализира чрез т.н. диференциална имплементация. Основната идея на диференциалната имплементация се състои в това регулатора да осигури управляващ сигнал \dot{u} , а интегратора на изхода - управляващ сигнал u . Тогава контролера ще бъде във форма подходяща за реализиране на коя да е от споменатите вече анти-насищащи стратегии.

D-имплементацията може да се интерпретира, като вариант при който грешката се диференцира на входа на регулатора, а се интегрира на изхода. Важно е да се спомене, че D-имплементацията се приема за ад-хок модификация на непрекъснатите регулатори и не гарантира същото входно-изходно поведение на регулатора.

Базирани на наблюдатели (Observer based)

При този тип подходи, най-общо ефектът от насищането се моделира като смущение внесено в основния контролер, а спомагателен регулатор базиран на синтез на наблюдател се използва за минимизиране на грешката между изходния сигнал на регулатора и входния сигнал към системата (обекта). Често задачите за синтез както на основния, така и на спомагателния регулатор се формулират като линейни матрични неравенства, то целия синтез на схемата за анти-насищане се свежда до оптимизационен проблем, като така се гарантира стабилността и производителността на цялата затворена система.

СРАВНЯВАНЕ НА АНТИ-НАСИЩАЩИ СТРАТЕГИИ ПРИ ПИД УПРАВЛЕНИЕ

Сравнението на различните стратегии за анти-насищане се извършва на базата на симулационни резултати в среда на Matlab/Simulink. Като обект за управление е избран линеен вибрационен транспортър с електромагнитно задвижване описван с предавателната функция:

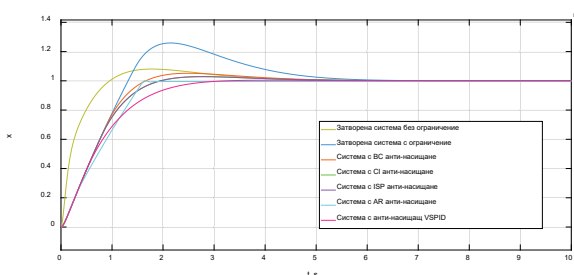
$$W_p(s) = \frac{1}{Ms^2 + bs + c}, \quad (2)$$

където: M – обобщена маса на устройството, b – коеф. на демпфериране, c – коравина на пружините.

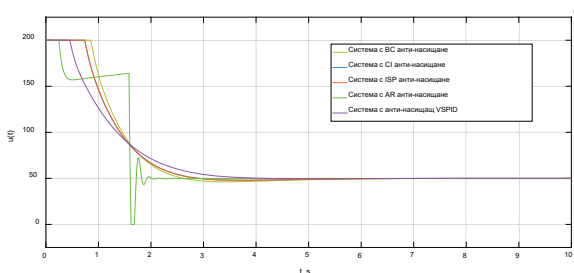
За вход на системата се приема прилаганата от електромагнитна сила, а за изход преместването на горната маса на устройството. Обикновено използваните електромагнитни са силно преоразмерени и на практика ограничения няма. В случая с цел изследване на техниките за интегрално анти-насищане се залага ограничение за максимално генерираната от електромагнитна сила на придърпване в границите от 0 до 200N.

При сравнението от описаните в предходната точка анти-насищащи стратегии се включват: Обратно изчисление, условно интегриране, интегрално прогнозиране на състоянието, автоматично нулиране и ПИД регулатор с променлива структура. Реализираното управление е ПИД регулатор, настроен с помощта на софтуерен инструмент в среда на Matlab. Коэффициентите на пропорционалната, интегралната и диференциалната част са въведени в използваните структури на регулатора съгласно всяка анти-насищаща схема.

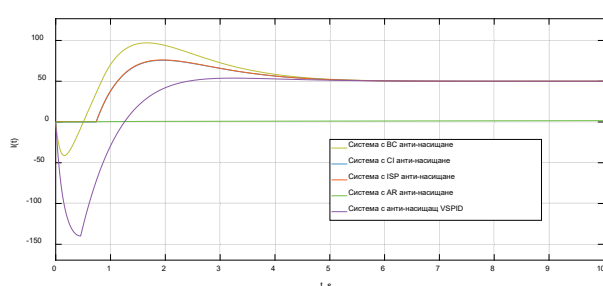
Сравнението се прави на база на качествата на преходните процеси на затворената система. На фиг. 6, 7 и 8 са показани преходните процеси, управляващ сигнал и сигнал от интегратора за затворените системи с различните реализирани схеми.



Фиг. 6. Преходни процеси на затворената система с анти-насищане



Фиг. 7. Управляващ сигнал на затворената система с анти-насищане



Фиг. 8. Състояние на интегралната съставяща на затворената система с анти-насищане

От показаните графики ясно се вижда поведението на системата без ограничение и с ограничение на управляващия сигнал, както при различните реализираните анти-насищащи стратегии. Най-ясна представа за качествата на системата при различните анти-насищания дава таблица 1.

Таблица 1 Сравняване на анти-насищащи стратегии и техники

Вид анти-насищане	t_{np},s	$\sigma, \%$	Колебателност
BC	5	5	-
CI	5	2,7	-
ISP	5	2,7	-
AR	2	0	Да
VSPID	3	0	-

Таблицата и фигурите показват теоретично описаните предимства и недостатъци на реализираните анти-насищащи техники. Критерии за избор на анти-насищаща стратегия остава видът на управляващото устройство, ниво на сложност и реализация и желаното качество на затворената система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията са подробно са представени някои от най-често използваните анти-насищащи стратегии при реализиране на ПИД управление и неговите производни. Направено е графично и аналитично сравнение при реализиране на 5 от тях за ПИД управление на линеен вибротранспортър. Изведените графики ясно показват предимствата и недостатъците на използваните схеми.

REFERENCE

- [1] Galeani, Sergio, et al. "A tutorial on modern anti-windup design." 2009 European Control Conference (ECC). IEEE, 2009.
- [2] Åström, Karl Johan, Tore Häggglund, and Karl J. Astrom. *Advanced PID control*. Vol. 461. Research Triangle Park, NC: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [3] Eliasi, H. "Design an anti-windup controller for a PWR power-level control in the presence of control rod speed saturation." *Annals of Nuclear Energy* 132 (2019): 415-426.
- [4] Cui, Mengjia, Zhen Zhang, and Peng Yan. "Tracking control of a large range 3D printed compliant nano-manipulator with enhanced anti-windup compensation." *Mechanical Systems and Signal Processing* 131 (2019): 33-48.
- [5] Lu, Yingbo, Panfeng Huang, and Zhongjie Meng. "Adaptive anti-windup control of post-capture combination via tethered space robot." *Advances in Space Research* 64.4 (2019): 847-860.
- [6] Zand, Javad Palizvan, et al. "A new time-domain robust anti-windup PID control scheme for vibration suppression of building structure." *Engineering Structures* 244 (2021): 112819.
- [7] E.F. Mulder, M.V. Kothare, and M. Morari. *Multivariable anti-windup controller synthesis using linear matrix inequalities*. *Automatica*, 37:1407–1416, 2001.
- [8] S. Galeani, M. Massimetti, A.R. Teel, and L. Zaccarian. *Reduced order linear anti-windup augmentation for stable linear systems*. *International Journal of Systems Science*, 37(2):115–127, 2006.
- [9] J.M. Gomes da Silva Jr. and S. Tarbouriech. *Anti-windup design with guaranteed region of stability: an LMI-based approach*. *IEEE Trans. Aut. Cont.*, 50(1):106–111, 2005.
- [10] J.M. Gomes da Silva Jr. and S. Tarbouriech. *Anti-windup design with guaranteed regions of stability for discrete-time linear systems*. *Systems and Control Letters*, 55(3):184–192, 2006.
- [11] G. Grimm, A.R. Teel, and L. Zaccarian. *Robust linear anti-windup synthesis for recovery of unconstrained performance*. *Int. J. Robust and Nonlinear Control (A)*, 14(13-15):1133–1168, 2004.
- [12] Bohn, C., and D. P. Atherton. "An analysis package comparing PID anti-windup strategies." *IEEE Control Systems Magazine* 15.2 (1995): 34-40.
- [13] Ghoshal, Anirban, and Vinod John. "Anti-windup Schemes for Proportional Integral and Proportional Resonant Controller." (2010).
- [14] Park, Jong-Gyu, Jae-Ho Chung, and Hwi-Beom Shin. "Anti-windup integral-proportional controller for variable-speed motor drives." *Journal of Power Electronics* 2.2 (2002): 130-138.
- [15] Wu, Fen, and Bei Lu. "Anti-windup control design for exponentially unstable LTI systems with actuator saturation." *Systems & Control Letters* 52.3-4 (2004): 305-322.
- [16] Shin, Hwi-Beom, and Jong-Gyu Park. "Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59.3 (2011): 1509-1516.
- [17] Geng, Xinpeng, et al. "Anti-windup Disturbance Rejection Control Design for Sampled Systems with Output Delay and Asymmetric Actuator Saturation Constraint." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 1349-1354.
- [18] Tran, Thanh Cong, and Jae Cheon Jung. "Development of anti-windup PI control and bumpless control transfer methodology for feedwater control system." *Annals of Nuclear Energy* 131 (2019): 233-241.
- [19] Theis, Julian, et al. "Observer-based LPV control with anti-windup compensation: a flight control example." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 7325-7330.
- [20] Eldigair, Yousif, et al. "Adaptive PI control with robust variable structure anti-windup strategy for systems with rate-limited actuators: Application to compression systems." *Control Engineering Practice* 96 (2020): 104282.
- [21] da Silva, Lucian R., Rodolfo CC Flesch, and Julio E. Normey-Rico. "Analysis of anti-windup techniques in PID control of processes with measurement noise." *IFAC-PapersOnLine* 51.4 (2018): 948-953.
- [22] Bui, Phuc Duc Hong, et al. "Dynamics modelling and motion control for high-speed underwater vehicles using H-infinity synthesis with anti-windup compensator Submitted to *Journal of Ocean Engineering and Science*." *Journal of Ocean Engineering and Science* (2021).
- [23] Zand, Javad Palizvan, et al. "A new time-domain robust anti-windup PID control scheme for vibration suppression of building structure." *Engineering Structures* 244 (2021): 112819.
- [24] Alfaro, Victor M., and Ramon Vilanova. "Conversion formulae and performance capabilities of two-degree-of-freedom PID

control algorithms." Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). IEEE, 2012.

[25] Santos, Tito LM, Taniel S. Franklin, and Bismark C. Torrico. "Anti-windup strategy for processes with multiple delays: A predictor-

based approach." Journal of the Franklin Institute 358.3 (2021): 1812-1838.

[26] Yan, Yifang, et al. "Sampled-data observer-based anti-windup control for singularly perturbed systems with actuator saturation." ISA transactions 91 (2019): 32-40.