

H_{∞} ROBUST CONTROL OF A SERVO SYSTEM³

Assoc. Prof. Donka Ivanova, PhD

Department of Automatics and Mechatronics,

University of Ruse "Angel Kanchev"

tel.: +35982 888 266

E-mail: divanova@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Martin Dejanov, PhD

Department of Automatics and Mechatronics,

University of Ruse "Angel Kanchev"

tel: +359 82 888 747

E-mail: mdejanov@uni-ruse.bg

Abstract: The main objective of the proposed paper is synthesizing of a H_{∞} robust control system for a servo motor. For the purpose of the study, a laboratory modular servo system of the company INTECO was used. The parameters of the H_{∞} controller was determined using the Robust Control Toolbox in the MATLAB using a simulation model. On the basis of a simulation model the system was developed and deployed to the real hardware for testing the synthesized controller. The results of the system were compared with those of a system with a standard PID controller. The system with robust controller shows much better performance in tracking the setpoints compared to the system with a standard one. The main advantage of the system with robust controller is in the processing of disturbances. The peak response in the robust system is about 2.5 times smaller compared to the one with standard controller. As for the steady state error, the system with synthesized controller achieves about 8.3 times smaller error compared to the system with a standard one. The main disadvantage of the controller is the longer duration of the process, intrinsic for PID controllers, which is compensated by the much better other quality indicators. In the operation of both systems (setpoint and disturbance processing) there are acceptable transient processes, which lead us to conclude that the synthesized robust controller not only satisfies the control requirements, but also improves the quality of the processes.

Keywords: H_{∞} controller, PID controller, Servo system

ВЪВЕДЕНИЕ

Обикновено този тип управление се прилага за сложни обекти с множество променливи на състоянието. Така например в (Jin, X. & Wang Q, 2023) е разработен нелинеен робастен регулатор за следване на траекторията на движение на автономни електрически превозни средства. В (Said, M., Larabi, M. S., & Kherief, N. M., 2023) се разглежда приложението на робастен регулатор при управление на квадрокоптер и е сравнена работата му със стандартни закони за регулиране. От представените резултати се вижда осезаемото подобрение на преходните процеси при управление с робастен регулатор. В (Apkarian, P. & D. Nolly; Apkarian, P., M. N. Dao & D. Noll, 2015; Gadewadikar J., F. Lewis, K. Subbarao & Ben M. Chen, 2008; Lundstorm P., S. S. Kogistud & Z. Q. Wang, 1991) са разгледани различни алгоритми за управление с цел постигане на устойчивост на системата, анализирана във времевата и честотната област. Оказва се, че синтезът на база H_{∞} играе важна роля в процеса на проектиране на робастния регулатор. В тази връзка са публикувани множество изследвания (Adams, R. J. & J. R. Bar-on, 1998; Hardiansyah & Junaidi, 2012) прилагащи именно този подход. В (Noshadi A., J. Shi, W. S. Lee, P. Shi and A. Kalam, 2015) се прилага подобен тип управление на лагерен магнит, като се извършва първоначално идентификация на системата (MIMO система), след което е синтезиран H_{∞} оптимален регулатор. В (Oloomi, H. and B. Shafai, 2003) е разработен робастен регулатор със смесена чувствителност за проследяване на синусоидален сигнал. В (Siqueira, A. A. G., M. H. Terra, J. Y. Ishihara & T. L. S. Barbeiro, 2009)

³ Докладът е представен в секция Електротехника, електроника и автоматика на 27 октомври 2023 с оригинално заглавие на български език: СИНТЕЗ НА H_{∞} РОБАСТНО УПРАВЛЕНИЕ НА СЕРВОСИСТЕМА

е проведен сравнителен анализ между три различни начина за проектиране на робастен регулатор за управление на робот-манипулатор с недостатъчно задействане и са определени показателите на качеството. В (Messirdi, M., Abdelmadjid, B. & Oudjamaa, 2023) се разглежда възможността за приложение на нелинейното робастно управление на асинхронен двигател. В (Brezina, L. and T. Brezina, 2011) е проектиран и анализиран H_∞ регулатор за управление на DC двигател с постоянни магнити, с неопределеност на параметрите му. В (Markovski, A. G., 2021) е синтезиран H_∞ регулатор за управление на модулна сервосистема. За приложението на Н-безкрайния синтез е необходима оптимизация, базирана на настройка, позволяваща запазване на Н- безкрайната норма на предавателната функция на затворената система на желана стойност. За преодоляване на това ограничение се предлага структуриран метод за синтез на H_∞ регулатор, като се използва нов набор от инструменти (Gahinet P. and P. Arkarian, 2011).

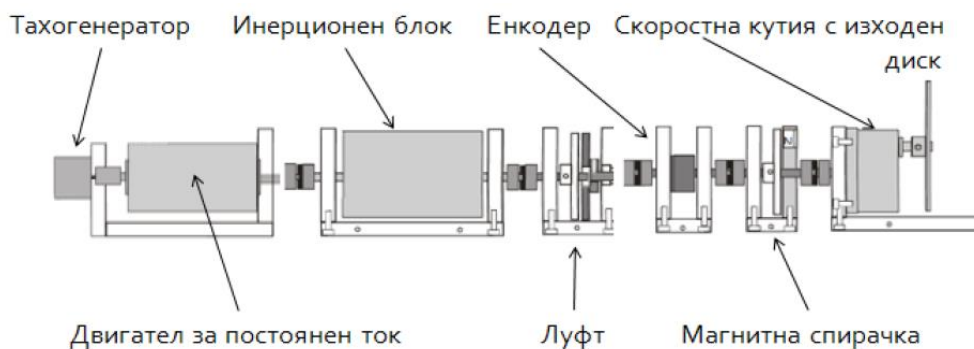
От така направения кратък анализ е видно, че възможностите на Н-безкрайност синтеза се използват в различни области.

Целта на настоящата статия е да се синтезира H_∞ робастно управление на лабораторна модулна сервосистема и се сравнят процесите в системата с тези при управлението ѝ с класически ПИД регулатор.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на изследване

Като обект на изследването е използвана лабораторна модулна сервосистема на фирма INTECO (Modular Servo System. User's Manual, 2013), представена на фиг.1.



Фиг. 1. Лабораторна модулна сервосистема

Тя се състои от множество модули, монтирани върху метална релса и куплирани един към друг. Модулите са съответно: постояннотоков електродвигател с независимо възбуждане, тахогенератор, инерционен блок, луфт, енкодер, магнитна спирачка, редуктор и следящ диск. Лабораторният стенд дава възможност лесно и бързо да се изследват различни видове алгоритми за управление. Бързото прототипиране е възможно благодарение на входно-изходния модул "RT-DAC/USB2 I/O board" (http://www.inteco.com.pl/wp-content/uploads/2014/05/RTDAC_USB2.pdf), чрез който в реално време се обменя информация между модулите на стенда и софтуера, инсталиран на компютъра. Това е възможно благодарение на предоставения от фирмата производител допълнителен тулбокс в средата на MATLAB/Simulink, посредством който могат да се разработят различните видове управляващи въздействия. За осъществяване на връзка между симулационния модел и модулите се използват два основни софтуерни компонента представляващи част от средата на Matlab, като това са: Real Time Workshop и Real Time Windows Target. Благодарение на тях е възможно да се генерира управляваща програма, която позволява управление на стенда в реално време. Друго предимство е и възможността за наблюдение на процесите в реално време в рамките на Simulink.

Управляемата величина е ъгълът на завъртане φ на двигателя, а управляващото въздействие е напрежението u подавано към двигателя. Важно уточнение е, че

управляващото въздействие е нормирано $|u(t)| \leq 1$. Предавателната функция на обекта на управление, като се пренебрегне електромагнитната времеконстанта на двигателя и динамиката на силовия електронен блок, има вида (Modular Servo System. User's Manual, 2013)

$$G(p) = \frac{k_M}{p(T_M p + 1)}, \quad (1)$$

където k_M е коефициентът на обекта и T_M е времеконстантата. За целта на изследването обектът е представен във фазово-координатна канонична форма в пространство на състоянието

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= C^T x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

където:

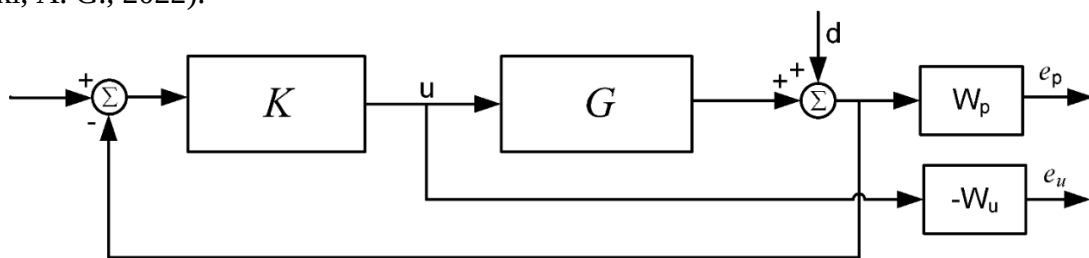
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_M} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_M \end{bmatrix}, \quad C^T = [1 \quad 0],$$

$$x_1(t) = y(t), \quad x_2(t) = \frac{dy(t)}{dt}.$$

Променливите на състоянието са ъгълът на завъртане на двигателя x_1 , измерван с фотоелектрически растерен преобразувател (енкодер) и ъгловата скорост на двигателя x_2 , която се измерва с тахогенератор.

Синтез на H_∞ регулатор

На фиг.2 е представена блоковата схема на системата. Целта на настоящата статия е да се синтезира- H_∞ регулатор, като се намери линейна обратна връзка по изхода $u(p) = K(p)y(p)$, която да осигурява робастна устойчивост и качество на затворената система. В схемата с G е означен обектът, зададен със структурирана неопределеност, като при номинален коефициент на предаване на двигателя $k_M = 190 \text{ rad}/(s * V)$ се задава интервал на неопределеност между 166 и 206. При номинална стойност на електромеханичната времеконстанта $T_M = 1 \text{ s}$ интервалът на неопределеност се задава в диапазона 0.84 – 1.24 (Markovski, A. G., 2022).



Фиг. 2. Структура на затворената система

Синтезираното управляващо устройство K трябва да направи затворената система вътрешно устойчива, като желаното качество на затворената система трябва да се постига за номиналния модел на обекта G_{nom} . Критерият за качество е представен посредством уравнението (Petkov, P., Lehov, G., Markovski, A., 2006):

$$\left\| \begin{bmatrix} W_p S(G_{nom}) \\ W_u K S(G_{nom}) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (3)$$

В уравнението посредством $S(G_{nom}) = (I + G_{nom}K)^{-1}$ е представена изходната функция на чувствителност на номиналната система, а W_p , W_u са тегловните функции, избрани така, че да представят изискванията към качеството в честотната област и

ограниченията към големината на управляващите въздействия. Затворената система постига робастна устойчивост за всички модели на обекта. За разглежданата задача системата трябва да остане устойчива в рамките на следните параметри, съответно за k_M между 166 и 206 и за T_M между 0.84 и 1.24.

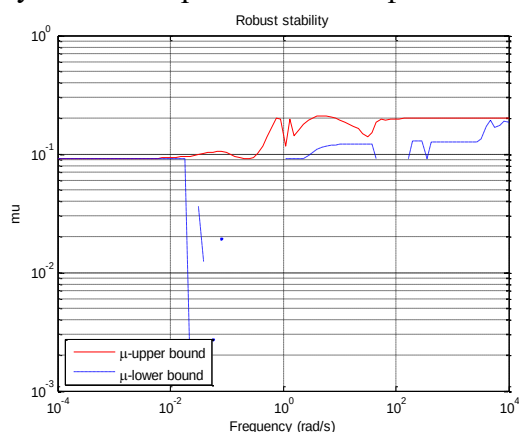
За всички модели на обекта G , трябва да се удовлетворява критерият за качество представен с уравнението (Petkov, P., Lehov, G., Markovski, A., 2006)

$$\left\| \begin{bmatrix} W_p(I + GK)^{-1} \\ W_u K(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1. \quad (4)$$

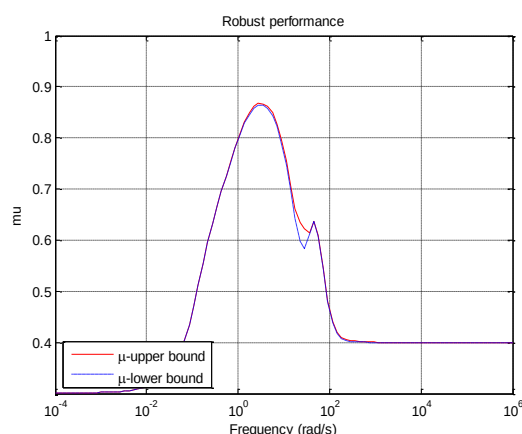
В разглежданата задача тегловната функция на качеството е от вида $W_p = \frac{0.4p+8}{p+0.14}$, а функцията на управлението е от вида $W_u = \frac{0.1p+2}{20p+50}$. При синтеза, за получаване на оптималното управляващо устройство са използвани команди от Robust Control Toolbox в средата на MATLAB (Da-Wei Gu et al., 2005). Управляващото устройство е от четвърти ред с предавателна функция, представена с уравнението

$$K = \frac{397.9p^3 + 1491p^2 + 1306p + 181}{p^4 + 109.4p^3 + 5783p^2 + 14680p + 1943}. \quad (5)$$

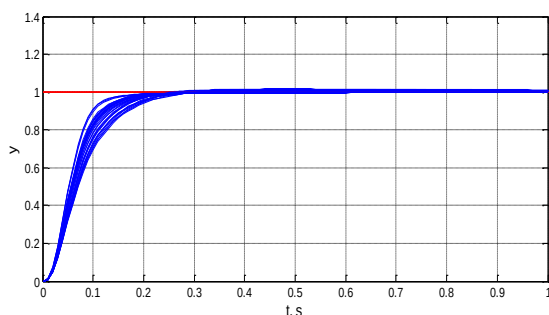
Синтезираната система е робастно устойчива с максимална стойност на μ нормата 0.2077, както е представено на фиг. 3, като се постига робастно качество при μ норма 0.8634, както се вижда от фиг. 4. Преходните процеси при симулиране на системата по задание и по смущение са представени на фиг. 5.



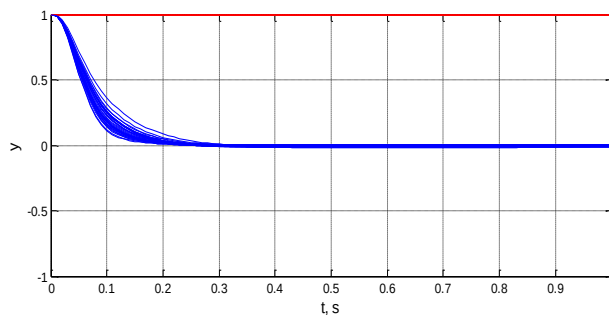
Фиг.3. Робастна устойчивост на затворената система



Фиг.4. Робастно качество на затворената система



а)



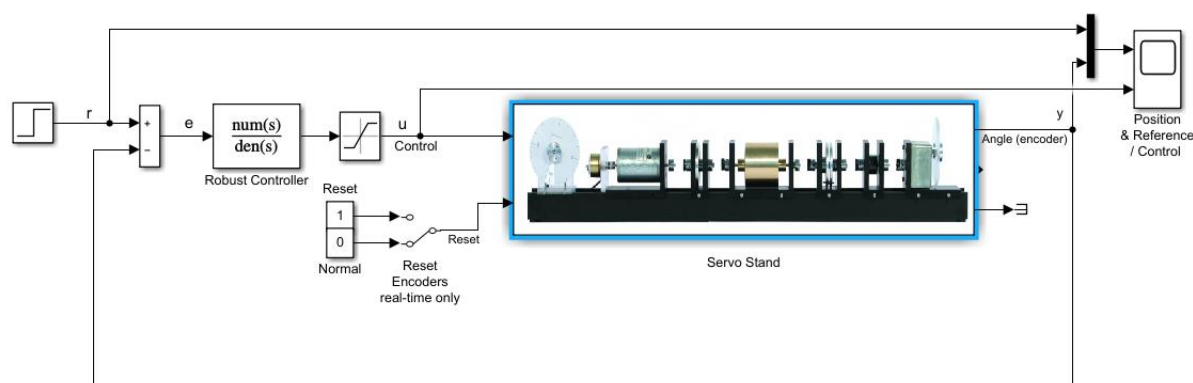
б)

Фиг. 5. Преходни процеси по: а) задаващо въздействие; б) смущаващо въздействие

Изследване работата на H_{∞} робастно управление

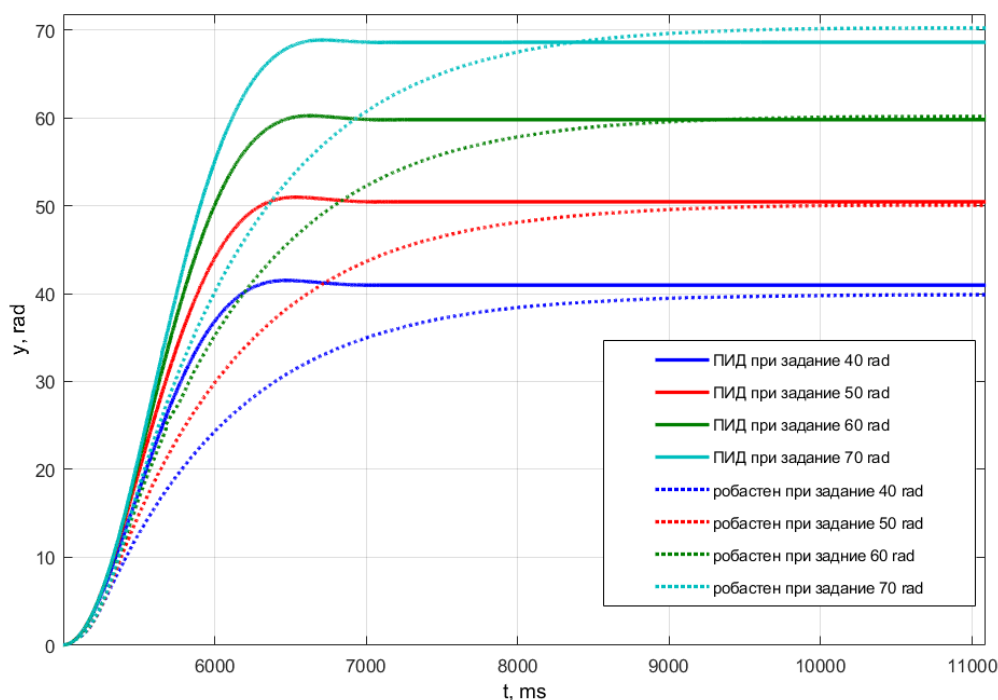
За целите на изследването е разработен симулационен модел на системата за управление на ъгъла на завъртане, като благодарение на възможностите за автоматично

генериране на код, този модел се изпълнява в реално време върху самата сервосистема. Така е възможно да се провери работата на системата, като се промени управляващото устройство от стандартен ПИД регулатор на робастен такъв. На фиг.6 е представен моделът на системата, като при направените изследвания единствено се променя вида на регулатора.



Фиг. 6. Модел на разработената система за управление

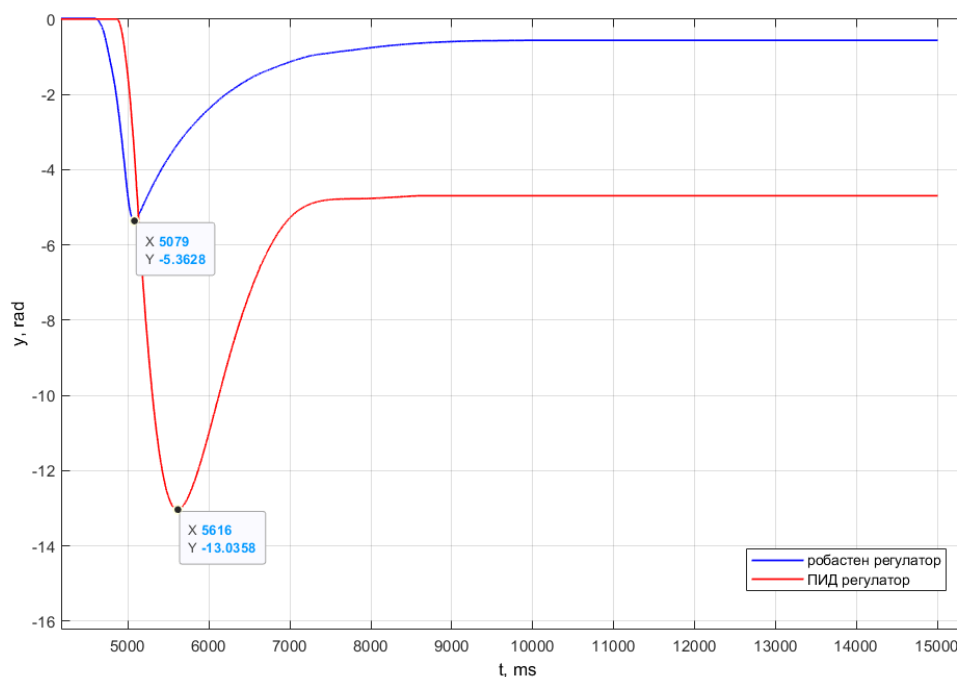
На фиг. 7 са представени преходните процеси при работа на системата с ПИД и със синтезирания H_∞ робастен регулатор при подаване на различни задаващи въздействия. При анализиране на реалната работа на системата е видно, че робастният регулатор работи по-добре по отношение на поддържане на зададената стойност - и в четирите варианта разликата между зададената и текущата стойност е незначителна. Точността при отработване на заданията от системата с ПИД регулатор е съществено по-малка. Недостатък на H_∞ управлението е по-голямото времетраене на преходните процеси - в рамките на 4 s, за разлика от ПИД регулатора, при който се установяват за около 1.5 s. Преходните процеси в системата с робастния регулатор са без пререгулиране.



Фиг. 7. Сравнителен анализ на преходни процеси по задание в системата с робастен регулатор и в системата с ПИД регулатор

Предимствата на робастния регулатор при управление на системата ясно си проличават при отработване на смущаващите въздействия. За целта на фиг. 8 са представени преходните

процеси в системата при работата на двата регулатора за отработване на подадено на системата смущение. Правят впечатление две неща: първо - максималното динамично отклонение в системата с робастния регулатор е над два пъти по-малко от това в системата с ПИД регулатор; второ - в системата с ПИД регулатор се получава около 5 пъти по-голяма грешка в установен режим в сравнение с тази в системата с робастен регулатор. Времето за установяване в системата с робастен регулатор е сравнително по-голямо отколкото в системата с ПИД регулатор.



Фиг. 8. Преходни процеси по смущение в системата с робастен регулатор и в системата с ПИД регулатор

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е синтезирано H_∞ робастно управление на сервосистема. За целта на изследването е използвана лабораторна модулна сервосистема на фирма INTECO. Параметрите на H_∞ регулатора са определени с използване на Robust Control Toolbox в средата на Matlab, като за целта на изследването е разработен и симулационен модел на системата за тестване на синтезирания регулатор. Резултатите от синтеза са сравнени с тези в система с ПИД регулатор. Точността при отработване на задаващите въздействия от системата с робастен регулатор е по-добра в сравнение с тази в системата с ПИД регулатор. Основното предимство на робастния регулатор е при отработване на смущаващи въздействия. Максимално динамичното отклонение на преходния процес е около 2.5 пъти по-малко в сравнение с това в системата със стандартния регулатор. Грешката в установен режим е около 8.3 пъти по-малка грешка в сравнение с грешката в системата със стандартния регулатор. Недостатък на работата на робастния регулатор е липсата на присъщото за ПИД регулатора бързодействие, което се компенсира от доста по-добрите останали показатели. Следователно, синтезираният робастен регулатор не само удовлетворява изискванията за управление, но и подобрява качеството на преходните процеси.

БЛАГОДАРНОСТИ

Докладът е финансиран по проект 2023-ЕЕА-05 “Изследване на възможностите за енергоефективно управление на улични осветителни системи”, финансиран от фонд „Научни изследвания“ на Русенския университет.

REFERENCES

- Adams, R. J. and J. R. Bar-on. Loop shaping to improve the multivariable phase margin, *Proceedings of 37th IEEE Conference on decision and control*, 1998, pp. 2757-2762.
- Apkarian, P. and D. Nolly. The H_∞ control problem is solved, *Institut de mathematiques Toulouse France*, [online] Available: <http://www.math.univtoulouse.fr/~noll/PAPERS/solved.pdf>.
- Apkarian, P., M. N. Dao and D. Noll. Parametric robust structured control design, *IEEE Transactions on automatic Control*, Vol. 60, № 7, 2015, pp. 1857-1869.
- Brezina, L. and T. Brezina. H-infinity controller design for a DC motor model with uncertain parameters, *Engineering mechanics*, Vol. 18, 2011, pp. 271-279.
- Da-Wei Gu, P. H. Petkov, M. M. Konstantinov. Robust Control Design with Matlab, Second Edition, Springer, 2005, p. 473.
- Gadewadikar J., F. Lewis, K. Subbarao and Ben M. Chen. Structured H-infinity command and control-loop design for unmanned helicopters, *Journal of guidance Control and dynamics*, Vol. 31, № 4, 2008, pp. 1093-1102.
- Gahinet P. and P. Apkarian. Structured H_∞ synthesis in MATLAB, *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy)*, 2011, pp. 1435-1440.
- Hardiansyah and Junaidi. Multiobjective H_2/H_∞ control design with regional pole constraint, *TELKOMNIKA*, Vol. 10, № 1, 2012, pp. 103-112.
- Jin, X. and Wang Q. Nonlinear Robust Control of Trajectory-Following for Autonomous Ground Electric Vehicles. Electric Vehicles - Design, Modelling and Simulation [Working Title]. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.112049, 2023.
- Lundstorm P., S. S. Kogistud and Z. Q. Wang. Weight selection for H-infinity and mu — control methods - insights and examples from process control, *Symposium on robust control system design using H-infinity and related methods*, 1991.
- Markovski, A. G. Robust Control of a Servo System using mu Synthesis and Regional Pole Placement Constraints, *Proceedings of the Technical University of Sofia*, ISSN:2738-8549, Vol. 71, №2, 2021, pp.37-40.
- Markovski, A. G. Robust PID Design for a Servosystem using mu Synthesis in MATLAB, *Proceedings of the Technical University of Sofia*, ISSN:2738-8549, Vol. 72, №2, 2022, pp.37-40.
- Messirdi, M., Abdelmadjid, B. & Oudjamaa, F. New Approach for Nonlinear Robust H-Infinity Control of an Induction Motor. *J Control Autom Electr Syst* 34, 2023, pp. 743–751, <https://doi.org/10.1007/s40313-023-01000-w>.
- Modular Servo System. User's Manual, 2013. http://www.inteco.com.pl/Docs/Servo_um.pdf
- Noshadi A., J. Shi, W. S. Lee, P. Shi and A. Kalam. System identification and robust control of multi-input multi-output active magnetic bearing systems, *IEEE Transactions on control Systems technology*, Vol. 24, № 4, 2015, pp. 1227-1239.
- Oloomi, H. and B. Shafai. Weight selection in mixed sensitivity robust control for improving the sinusoidal tracking performance, *Proceedings of 42nd IEEE conference on decision and control*, 2003, pp. 300-305.
- Petkov, P., Lehov, G., Markovski, A. (2006). Robust Control System. Analysis and synthesis with Matlab, Sofia, p. 302. (**Оригинално заглавие:** Петков, П., Г. Лехов, А. Марковски, 2006. Ръководство по робастни системи за управление. Анализ и синтез с Matlab, С., стр. 302).
- Said, M., Larabi, M. S., & Kherief, N. M. Robust control of a quadcopter using PID and H_∞ controller. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 8(1), 2023, pp. 3-11.
- Siqueira, A. A. G., M. H. Terra, J. Y. Ishihara and T. L. S. Barbeiro, Underactuated manipulator robot control via H_2 , H_∞ , H_2/H_∞ and μ -synthesis approaches: A comparative study, *J. of the Braz. Soc. of mech. sci. & eng.*, Vol. XXXI, № 4, 2009, pp. 279-288.
- http://www.inteco.com.pl/wp-content/uploads/2014/05/RTDAC_USB2.pdf