

СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КОРМИЛНА ЕЛЕКТРОХИДРАВЛИЧНА ЗАДВИЖВАЩА СИСТЕМА

Александър Митов, Йордан Кралев, Цоньо Славов, Илчо Ангелов

Абстракт: В работата са представени резултатите от проектирането и реализацията на лабораторна установка за изследване на системата за управление на електрохидравлична кормилна уредба за бавноходни машини. Извършена е проверка на работоспособността на разработена от авторите система за управление на електрохидравлично кормилно устройство (ЕХКУ), базирана на робастен H_∞ регулатор. В сравнение с други подобни разработки, тук се използва допълнителна обратна връзка по позицията на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител (LVDT сензора) вграден в ЕХКУ, с помощта на която се постига по-добро качество на управление. Синтезът на H_∞ регулатора се базира на решаване на задача за смесена чувствителност по многомерен модел с три изхода и един вход, получен със средствата на идентификацията. Експерименталните изследвания показват работоспособността на разработената система.

Ключови думи: вградена система за управление, H_∞ регулатор, електрохидравлична кормилна система

LABORATORY SETUP FOR INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEM FOR ELECTROHYDRAULIC STEERING UNITS

Alexander Mitov, Tsonyo Slavov, Jordan Kraleov, Ilcho Angelov

Abstract: In this paper, the developed experimental setup for investigation of electrohydraulic steering units (EHSU) is presented. The workability of designed by the authors system for control of electrohydraulic steering with controller is investigated. In comparison with other similar control systems, the presented one uses additional feedback-signal from sensor for position of proportional spool valve (LVDT) integrated into EHSU. This feedback allows achieving better performance of control systems. The design of the controller is done by solving a mixed sensitivity optimization problem. The plant model used in controller synthesis is multivariable model with three outputs and one input. This model is obtained by identification procedure. The presented experimental results show workability of the developed system.

Key-words: embedded control system, H_∞ controller, electrohydraulic steering system

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В практиката на управление на бавноходовите машини все по-широко приложение намират електрохидравличните кормилни системи (ЕХКС). Тези системи позволяват два режима на работа – ръчен, при който задаващия сигнал се подава посредством волан и автоматичен, при който заданието се формира от джойстик или GPS сигнал. Съвременните ЕХКС за управление на мобилни машини обикновено се състоят от конвенционално хидравлично кормилно устройство (ХКУ), вграден в него (или външно свързан) приоритетен клапан, работещ съвместно с клапан за усилване по дебит, осигуряващ товаро-чувствителна (Load-Sensing) функция на системата, хидравличен разпределител с пропорционално електрическо управление от електрохидравличен управляващ модул, кормилен серво цилиндър и сензори. Благодарение на обратната връзка по сензорите за позиция на волана и пропорционалния хидравличен разпределител, системата за управление осигурява променливо предавателно отношение от волана към управляемата кормилна ос на машината [1]. Способността за управление на енергийните величини (налягане и дебит) чрез електронни сигнали стимулира разработването на вградени системи, насочени към хидравлични приложения за задвижване. Крайната цел на вградената електроника в хидравличните устройства е подобряването на експлоатационните характеристики, безопасността и възможностите за диагностика. Тъй като хидравличните машини, елементи и устройства за задвижване се проектират по отношение на максимално ефективно използване на енергията, то техните конструктивни изпълнения се характеризират с нелинейност при моделирането им. Неопределеността причинена от тези елементи може да наруши устойчивостта и ефективността на затворената система за управление. Вградените алгоритми трябва да бъдат внимателно изследвани по отношение на неопределеността преди тяхното вграждане в реалната машина.

За да се проектира и реализира качествена вградена система за управление от една страна е необходим достатъчно добър математичен модел на обекта за управление. От друга страна, т.к. това ще е модел за целите на управлението той не би трябвало да е прекалено сложен, а напротив би трябвало да е изведен на базата на принципа на икономичността. Именно поради тези причини за получаването на многомерния модел на обекта се използва идентификационна процедура, а самият обект се разглежда като “черна кутия” [2]. Входният сигнал на модела представлява напрежението, което се подава към управляващия модул на пропорционалния хидравличен разпределител, а изходите на модела са позицията на вградения в разпределителя регулиращ елемент (плунжер), дебита на работната течност и позицията на буталото на кормилния серво цилиндър. Изходните сигнали дават информация за поведението на обекта в различни честотни диапазони. Така например позицията на плунжера характеризира високочестотната динамика на обекта, докато дебита на работната течност и позицията на буталото на цилиндъра характеризират нискочестотната динамика.

След получаването на модела се пристъпва към синтез на управляващия алгоритъм и неговата реализация в подходящо цифрово управляващо устройство. Преди окончателна реализация на системата за управление, обаче е необходимо

да се извършат редица тестове в условия близки до реалните. По този начин може да се изследва работоспособността на различни алгоритми за управление в реални условия и да се направи обоснован избор на някой от тях за окончателната реализация в системата. С оглед на това е изключително важно да се разработи система с помощта, на която лесно да могат да се провеждат експерименти с обекта на управление и да се извършват тестове на различни алгоритми за управление.

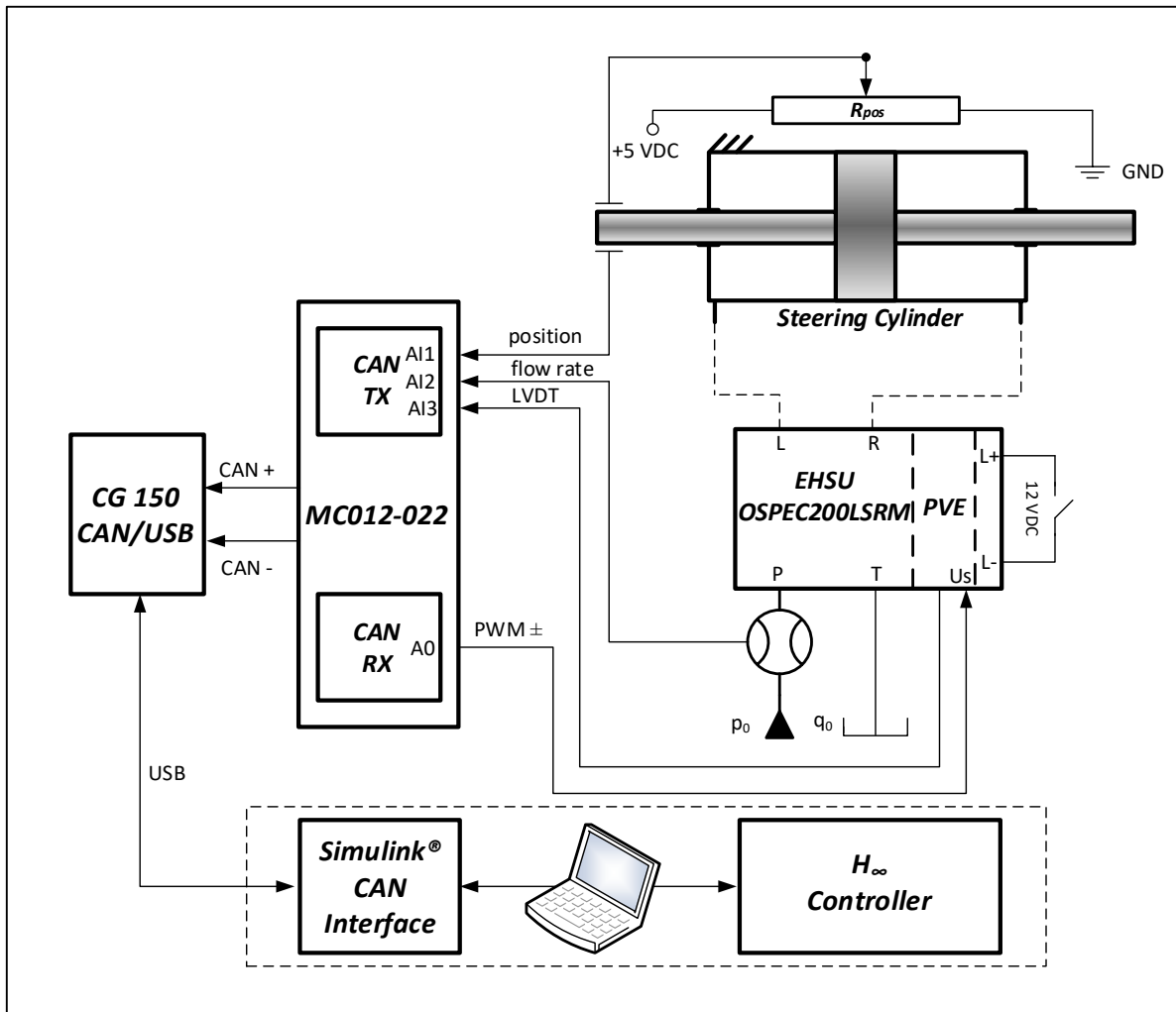
За управлението на този обект авторите са експериментирали с различни алгоритми като каскадно управление базирано на ПИД регулатор и линейно-квадратичен гаусов (LQG) регулатор. Основното предимство на ПИД регулатора е, че е достатъчно опростен и сравнително лесно се настройва, но той не може да осигури оптимално качество на ЕХКС за управление. Линейно-квадратичния гаусов регулатор осигурява оптимално качество, но е известен със своята влошена робастност. Именно това създава предпоставка за синтез на H_{∞} управляващо устройство.

В настоящата работа са представени резултатите от проектирането и реализацията на система за изпитване на алгоритми за управление на електрохидравлична кормилна уредба за бавноходови мобилни машини. Извършена е проверка на работоспособността на разработена от авторите система за управление на електрохидравлично кормилно устройство, базирана на робастен H_{∞} регулатор. В сравнение с други подобни разработки на авторите, тук се използва допълнителна обратна връзка по позицията на плунжера на пропорционалния хидравличен разпределител (LVDT сензора), с помощта на която се постига по-добро качество на системата за управление. Синтезът на H_{∞} регулатора се базира на решаване на задача за смесена чувствителност по многомерен модел с три изхода и един вход, получен със средствата на идентификацията.

2. ОПИСАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА УСТАНОВКА

Вграденият H_{∞} регулатор е предназначен в лабораторен стенд за изследване на електрохидравлични кормилни системи базиран на ЕХКУ тип OSPE200 LSRM. Лабораторният стенд е изграден с технически спецификации на производителите на мобилни машини [3]. Хидравличната схема на стенда е описана подробно в [4]. Архитектурата му е показана на Фиг.1. Управляващото устройство представлява специализиран промишлен контролер MC012-022 за приложение в кормилни системи на мобилни машини. Чрез него се генерират управляващите сигнали и се получават сигналите от обратната връзка. Управляващият сигнал представлява ШИМ напрежение приложено върху електрохидравличния управляващ модул за непряко управление на пропорционалния хидравличен разпределител. Втората част на системата е каналът за CAN комуникация между промишления микроконтролер и работната станция със специализирания SIMULINK® модел. Този модел работи в реално време и обменя информация с микроконтролера. В SIMULINK® модела се реализират разработените управляващи алгоритми. По този начин се осигурява възможност: за лесно изпитване на

работоспособността на различни управляващи алгоритми; за визуализация и обработка на входно изходните данни в реално време и др.



Фиг. 1. Архитектура на лабораторния стенд за тестване на системи за управление на кормилни уредби

Архитектурата на системата от Фиг.1 изисква времето за обмен на данните между работната станция и микроконтролера да е много по-малко от такта на дискретизация на изпитваната система за управление. Ако времето за изпращане на данни от микроконтролера до SIMULINK[®] модела е τ_1 , времето за изпълнение на един цикъл на SIMULINK[®] модела е τ_2 , а времето за получаване на данните обратно в микроконтролера е τ_3 , то тогава за работа в реално време на системата е необходимо $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 < T_0$, където T_0 е такта на дискретизация. Експериментално е установено, че за използваната работна станция с работещия в реално време H_∞ регулатор $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0.01s$, а такта на дискретизация е $0.025s$, при което може да се приеме, че системата работи в реално време. Работещият в реално време SIMULINK[®] модел се изпълнява с постоянна стъпка в непрекъснато или дискретно време. Разработен е специализиран комуникационен блок, който осигурява връзка чрез CG150 USB/CAN комуникационен преходник. Блокът използва библиотеката MATLAB[®] Vehicle Network Toolbox, в която има блокове за

CAN комуникация с устройства на различни производители. Разработеният блок приема CAN съобщение в блокиращ режим, при което изпълнението на SIMULINK® модела се блокира, докато не се получи потвърждение за получаване на съобщението. След това блоковете от модела се изпълняват еднократно и отново се влиза в блокиращ режим, докато не се получи CAN съобщение от MC012-022 микроконтролера. Тъй като изчислителните възможности на работната станция могат да се разширяват значително, на практика с такъв вид архитектура могат да се изпитват сложни закони за управление от висок ред.

3. ПРОЕКТИРАНЕ НА H_∞ РЕГУЛАТОР

Идентификация на многомерен модел

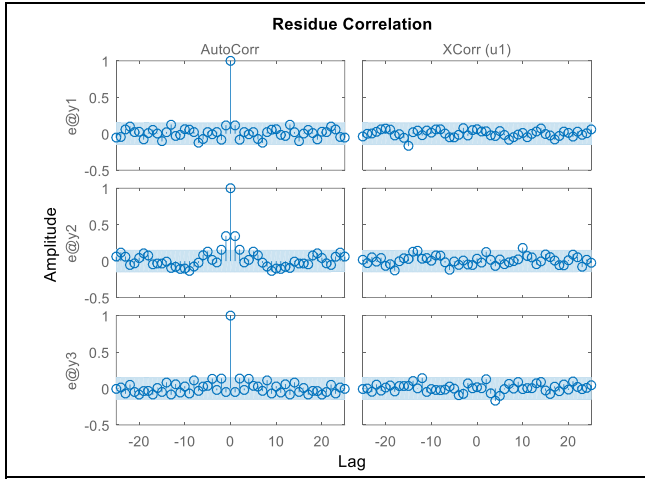
Проектирането на H_∞ регулатори изисква линеен модел на обекта в пространството на състоянията. За целта чрез процедура за идентификация е оценен дискретен стохастичен модел от трети ред при такт на дискретизация $T_s = 0.05s$.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + K_v v(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{aligned} \quad (1)$$

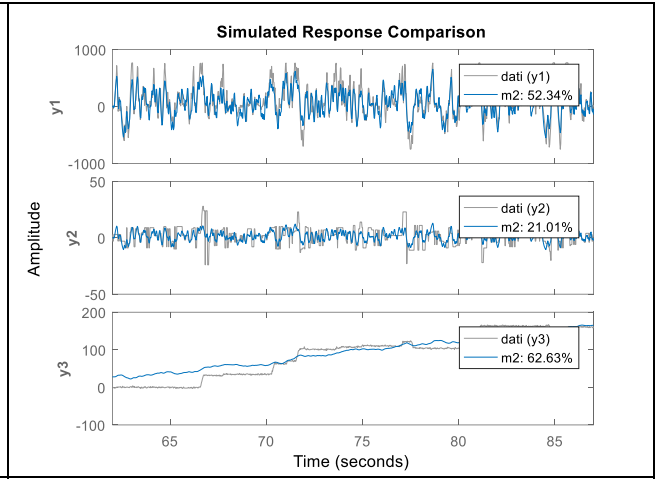
където $x(k) = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ е векторът на състоянието, $y = [y_{lvd} \ y_{flow} \ y_{piston}]^T$ е векторът с изходните сигнали, y_{spool} е позицията на плунжера на разпределителя, y_{flow} е дебита на работната течност към цилиндъра, y_{piston} е позицията на буталото и $v(k) = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$ е вектор с остатъчната грешка. За параметрите на оценения модел (1) се получава

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -1.05 & 0.19 & 6.27 \\ -0.04 & 1 & 0.198 \\ -0.371 & 0.033 & 2.044 \end{bmatrix}, B = 10^{-3} \begin{bmatrix} -0.37 \\ -0.034 \\ -0.23 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} -31 & 0.67 & -6.58 \\ -0.584 & 0.007 & -0.25 \\ 0.059 & -2.019 & 0.125 \end{bmatrix}, \\ D &= 10^{-3} \begin{bmatrix} 0.117 \\ 0.014 \\ 0.0021 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} -0.025 & -0.023 & -0.022 \\ -0.002 & 0.0066 & -0.429 \\ -0.007 & -0.01 & 0.0033 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

В детайли резултатите от идентификацията са представени в [5]. Тук накратко са показани най-важните резултати от валидацията на модела. На Фиг.2 и Фиг. 3 са показани резултати от корелационен тест на остатъците и тест на изходните сигнали на обект и модел. От получените резултати се вижда, че оценките на параметрите са неизместени. Липсва корелация между входния сигнал и остатъците, което показва, че моделът (1) описва достатъчно точно динамиката на обекта. Съвпадението между изходните сигнали на модела и обекта е достатъчно високо с изключение на това между дебита от модела и измерения дебит, което е само 21%. Обяснението за това е, че отклоненията в дебита са малки, поради което съотношението шум/полезен сигнал е голямо. Въпреки това полученият модел е достатъчно добър за синтез на регулатор.



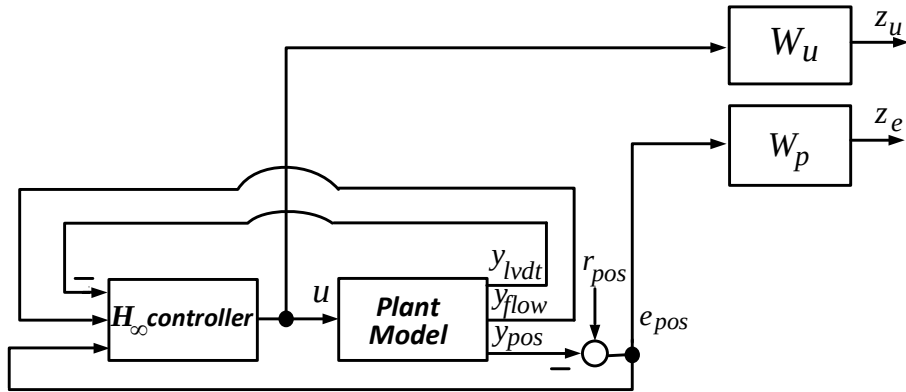
Фиг. 2. Корелационен тест на остатъците



Фиг. 3. Тест на изходните сигнали

Синтез на H_∞ регулатор

Структурната схема, по която се проектира H_∞ регулатора е показана на Фиг. 4. Тя съответства на S/ KS критерий за минимизация на изходната чувствителност и управляващия сигнал [6].



Фиг. 4. Схема за синтез на H_∞ регулатор

Изискванията за качество и ефективност на затворената система се определят с тегловните функции W_p и W_u

$$z_e = W_p e, \quad z_u = W_u u, \quad (3)$$

където $e = (-y_{lvd}, -y_{flow}, e_{pos})^T$, $e_{pos} = r_{pos} - y_{pos}$. Отчитайки, че предавателната матрица на изходната чувствителност е

$$S = [I + GK]^{-1}, \quad (4)$$

където G е предавателната матрица на обекта и K е предавателната матрица на регулатора, то предавателните матрици между изходите за качество и заданието по позиция са

$$z_e = W_p S r, \quad z_u = W_u K S r, \quad (5)$$

където $r = (0, 0, r_{pos})^T$ е вектор със заданието, а r_{pos} е желаната позиция на буталото

на цилиндъра. Така задачата за синтез на H_∞ регулатор се свежда до решаване на следната оптимизационна задача

$$\min_{K_{\text{stabilizing}}} \left\| \begin{bmatrix} W_p S \\ W_u KS \end{bmatrix} \right\|_\infty. \quad (6)$$

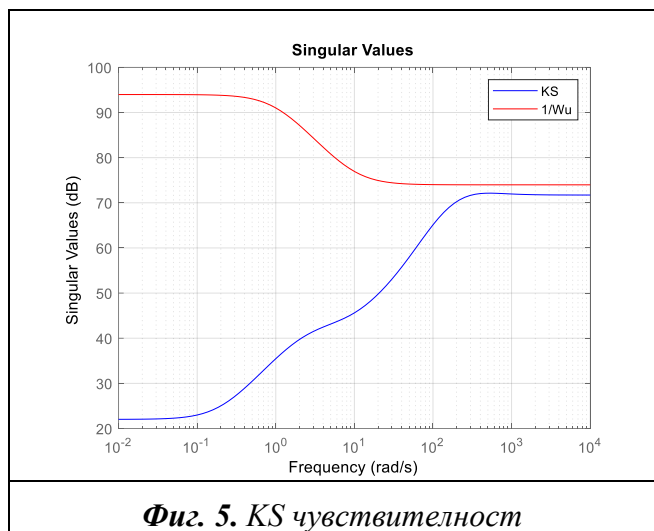
Синтезът на H_∞ регулатор е извършен за няколко различни тегловни функции. Основните ограничения при синтеза идват от зоната на нечувствителност в пропорционалния разпределител, която е въведена от съображения за безопасност при случайно подаване на малки или нежелани задания от оператора или вътрешни обемни загуби в ЕХКУ, които биха довели до самозавиване. Зоната на нечувствителност ограничава качеството, което може да се постигне с обратната връзка, т.к. ако коефициентът на усилване е твърде малък заданието няма да може да се достигне и обратно ако коефициентът на усилване е твърде голям могат да възникнат автоколебания. Тези колебания ще се предадат към колелата на машината, което е крайно нежелателно. Един начин да се потиснат колебанията е да се увеличи усилването на високочестотния филтър W_u във високите честоти. Това обаче ще ограничи честотната лента на системата и оттам ще забави преходните процеси. Полученият от идентификацията модел позволява да се увеличи усилването в канала по дебит, което има положителен ефект за потискане на колебанията. Тегловните филтри са избрани като

$$W_u = 2 \times 10^{-5} \frac{s+1}{0.1s+1}, \quad W_e = \text{diag} \left(0.1 \quad 1 \quad 20 \frac{0.1s+1}{3s+1} \right). \quad (7)$$

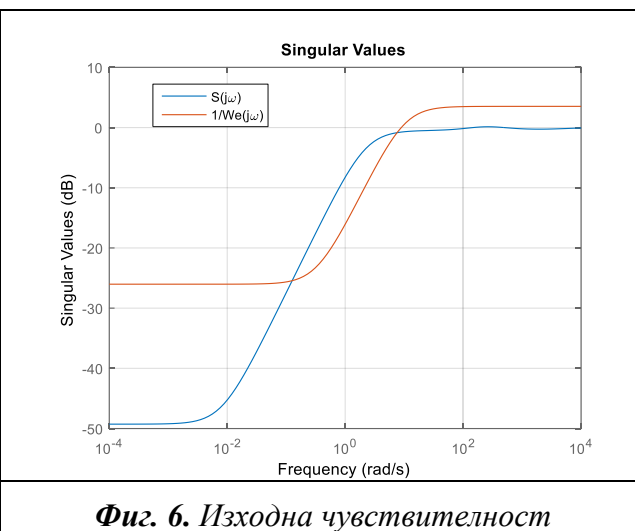
В резултат на минимизацията на (6) е получен регулатор от *пети ред*, който гарантира устойчивост на затворената система. Горната граница на H_∞ нормата (6) е 2, което показва че изискванията на синтеза са удовлетворени в голяма степен. На Фиг. 5 и Фиг. 6 са показани KS чувствителността на системата с H_∞ регулатор и функцията на изходната чувствителност по отношение на позицията на буталото на цилиндъра, сравнени с обратните предавателни функции на тегловните филтри. Затворената система потиска много добре нискочестотните смущения. Например смущение с честота 0.01 rad/s ще бъде потиснато над 100 пъти. Недостатък е високата стойност на KS чувствителността при високите честоти.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА H_∞ РЕГУЛАТОРА

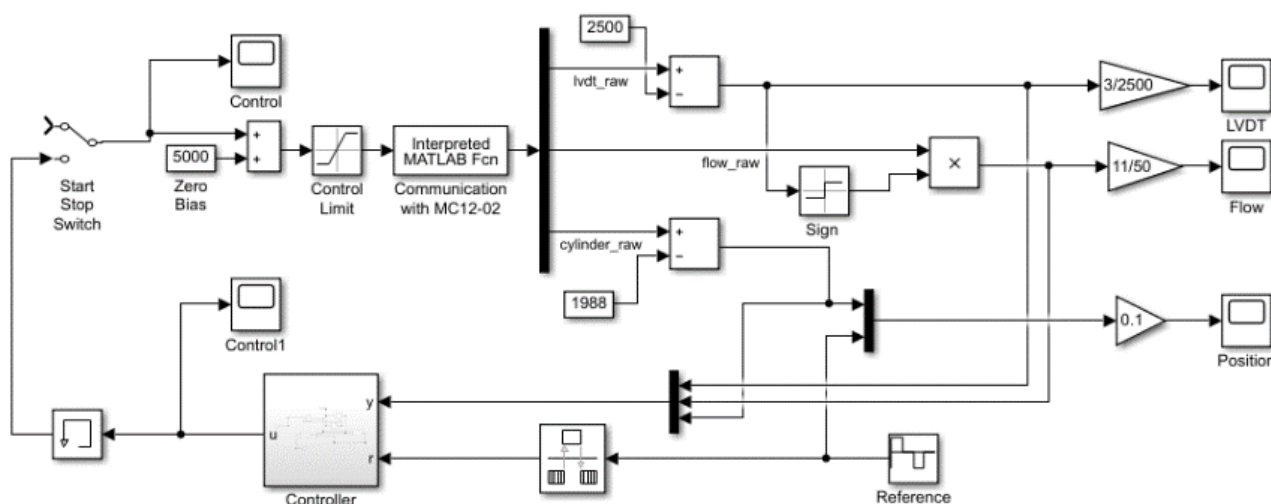
Разработеният SIMULINK® модел, който се използва за изследване на H_∞ регулатора е показан на Фиг. 7 [7]. Основният елемент в модела е блокът *Interpreted Matlab Function*, с помощта на който се осъществява комуникация по CAN протокол между работната станция и промишления контролер MC012-022. С помощта на този блок целия SIMULINK® модел се изпълнява в блокиращ режим. Експерименталните изследвания са извършени при постоянно натоварване по налягане (5MPa) в двете работни камери на серво цилиндъра осигурено от системата за натоварване по налягане реализирана чрез специално разработен хидравличен блок с подпорни клапани.



Фиг. 5. KS чувствителност

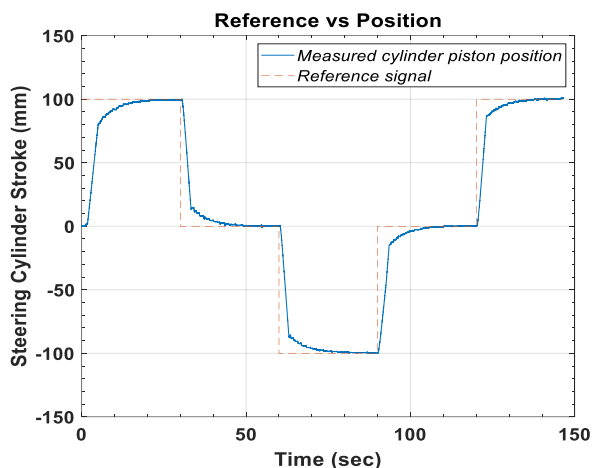


Фиг. 6. Изходна чувствителност

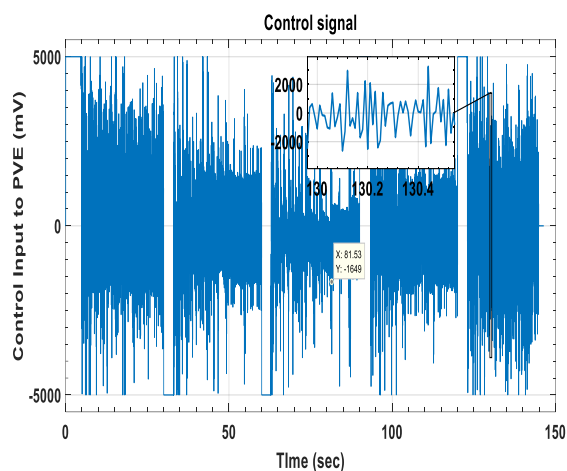


Фиг. 7. SIMULINK[®] модел за изследване на H_{∞} регулатора в реално време

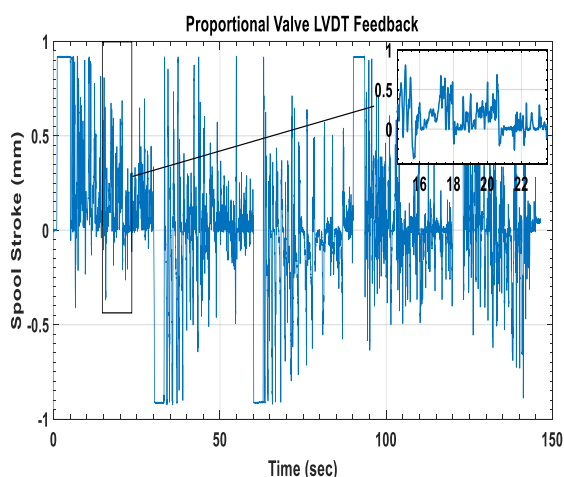
На Фиг. 8 е показан запис на заданието по позиция на буталото на цилиндъра и измерената позиция на буталото, а на Фиг. 9 е показан управляващия сигнал в системата. Вижда се, че затворената система следи заданието по позиция без грешка в установен режим, преходният процес е апериодичен и затихва за около 10 s. Доброто качество на преходния процес в системата се постига за сметка на високочестотен управляващ сигнал, което се вижда и от Фиг. 9. Въпреки това колебанията в управляващия сигнал са допустими и той заема стойност равна на ограниченията си от $\pm 5000\text{mV}$ за кратко време. На Фиг.10 е показана измерената позиция на пропорционалния разпределител. Както следва и да се очаква разпределителят следва управляващия сигнал много добре. На Фиг. 11 е показан преходния процес по дебит. Вижда се, че максималният дебит отделен от приоритетния клапан за ЕХКУ е около 8l/min , при дебит на нерегулируемата помпа около 30l/min . Това показва енергийната ефективност на разработената система и създава предпоставка за извършване на енергиен анализ.



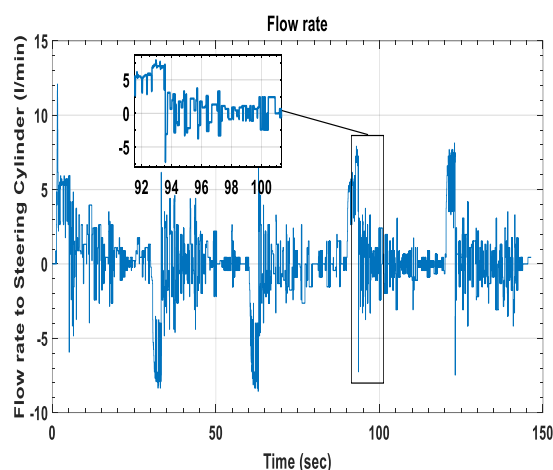
Фиг. 8. Задание и измерена позиция на буталото на цилиндъра с H_{∞} регулатор



Фиг. 9. Управляващ сигнал на системата с H_{∞} регулатор



Фиг. 10. Позиция на LVDT



Фиг. 11. Преходен процес по дебит

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представен разработения стенд за изследване на системи за управление на електрохидравлични кормилни системи на бавноходови машини. С негова помощ е извършена проверка на работоспособността на система за управление на електрохидравлична кормилна уредба, базирана на H_{∞} регулатор. За разлика от съществуващите системи за управление на кормилни уредби, разработената използва допълнителна обратна връзка по позицията на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител, с което се постигат по-добри следящи свойства. Преходните процеси по позиция на буталото на цилиндъра са апериодични с време за регулиране около 10s. Постигнато е еднакво високо качество при движението в двете посоки. Получените експериментални резултати потвърждават направените изводи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Más, F., Zhang, Q. etc. *Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles*. Springer-Verlag London Limited, 2010
- [2] Ljung, L. *System Identification: Theory for the User*. Second edition. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1999.
- [3] Danfoss, “OSPE Steering Valve“, Technical Information, 11068682, November, 2016
- [4] Angelov, Il., Mitov, Al. “Test Bench for Experimental Research and Identification of Electrohydraulic Steering Units“, International Fluid Power Conference, 10thIFK`2016, ISBN 978-3-9816480-1-0, Dresden, Germany, 2016
- [5] Mitov, Al., Krlev, J., Slavov, Ts., Angelov, Il. SIMO System Identification of Transfer Function Model for Electrohydraulic Power Steering. 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), June, 2019, Bulgaria, pp. 130-135.
- [6] Zhou, K., Doyle, J. etc. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall International Inc., Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [7] Petkov, P., Slavov, Ts., Krlev, J. Design of Embedded Robust Control Systems using MATLAB®/Simulink®. IET Control, Robotics and Sensor Series 113. ISBN 978-1-78561-3330-2, 2018.

Автори: *Александър Митов*, гл. ас. д-р, Технически университет-София,
Енергомашиностроителен факултет, кат. Хидроаеродинамика и хидравлични машини
e-mail: a_mitov@tu-sofia.bg

Йордан Крлев, гл. ас. д-р, Технически университет-София, Факултет Автоматика,
кат. Системи и управление
e-mail: jkrlev@tu-sofia.bg

Цоньо Славов, доц. д-р, Технически университет-София, Факултет Автоматика,
кат. Системи и управление
e-mail: ts_slavov@tu-sofia.bg

Илчо Ангелов, проф. д-р, Технически университет-София,
Енергомашиностроителен факултет, кат. Хидроаеродинамика и хидравлични машини
e-mail: ilangel@tu-sofia.bg

Authors: *Assist prof. Dr. Alexander Mitov*, Technical University of Sofia, Faculty of Power Engineering and Power Machines, dept. Hydroaerodynamics and Hydraulic Machines,
e-mail: a_mitov@tu-sofia.bg

Assist prof. Dr. Jordan Krlev, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,
dept. Systems and Control
e-mail: jkrlev@tu-sofia.bg

Assoc. prof. Dr. Tsonyo Slavov, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,
dept. Systems and Control
e-mail: ts_slavov@tu-sofia.bg

Prof. Dr. Ilcho Angelov, Technical University of Sofia, Faculty of Power Engineering and Power Machines, dept. Hydroaerodynamics and Hydraulic Machines,
e-mail: ilangel@tu-sofia.bg