

Експериментално изследване на честотни характеристики на електрохидравлична кормилна система с цифрово управление

Александър Митов, Йордан Кралев, Илчо Ангелов

Experimental study of the frequency characteristics of electrohydraulic steering system with digital control: This paper investigated electrohydraulic steering system with digital control. Presents plan and realization of physical experiment with different frequencies of sinusoidal input signal. Based on experimental studies were obtained frequency characteristics of the system, based on which is analyzed the dynamic behavior.

Key words: Steering System, Digital Control, Experiment, Frequency Characteristics;

ВЪВЕДЕНИЕ

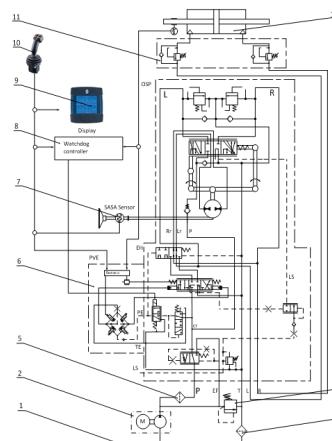
Разпростанилият се през последните десет години нов вид електрохидравлични кормилни устройства (*EXKY*) тип OSPE, дава възможност, не само за управление на траекторията на мобилни машини чрез волан, но и чрез подаване на управляващи сигнали от електрически и/или дистанционен интерфейс – джойстик, GPS и др. Сравнително бързото развитие на този тип кормилни устройства свидетелства за успешното приложение на системите с цифрово хидравлично управление оформили през последното десетилетие направлението – дигитална хидравлика.

Настоящата работа е продължение на експериментално изследваните динамични характеристики [1] на хидравлична задвижваща система, състояща се от *EXKY* с цифрово управление и изпълнителен сервоцилиндър. Експерименталните изследвания са извършени на стенд за изпитване на *EXKY* в катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини“ при Технически Университет – София.

Основната цел е да се представи планирането и реализацията на физически експеримент, с оглед получаване на честотните характеристики на изследваната система. На база на получените характеристики са извършени оценка и анализ на динамичното ѝ поведение.

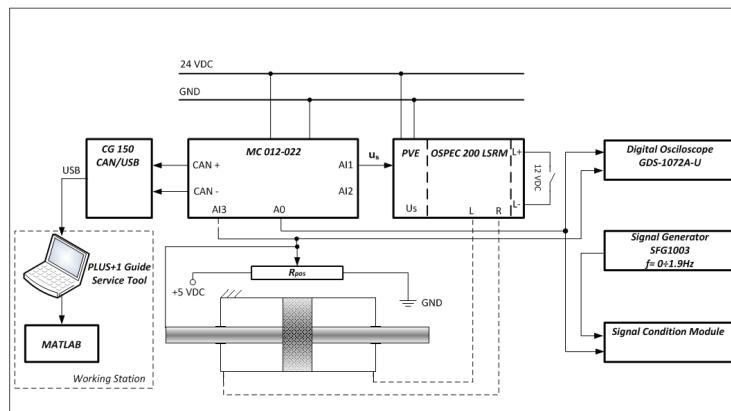
1. Схема и постановка на експерименталната система.

На Фиг.1 е показана хидравличната схема на стенда за изпитване на *EXKY*, описана подробно в [2].



Фиг.1 Хидравлична схема на стенд за изпитване на *EXKY*.

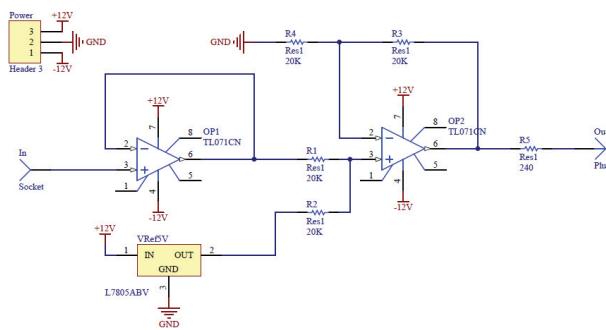
Експерименталната система (Фиг.2) се състои EXKY тип OSPE 200 и задвижван от него равноплощен сервоцилиндър ($80x50x300\text{ mm}$) свързани чрез тръбопроводи, посредством L и R . Входно задаващо устройство е сигнален генератор тип SFG1003, генериращ синусоидални електрически сигнали. За онагледяване на сигналите по време на тяхното мащабиране и за отчитане (запис) на динамичните процеси при различните честоти е използван цифров осцилоскоп тип GDS-1072A-U.



Фиг.2 Принципна схема на експерименталната система.

Разликите между изходните сигнали от сигналния генератор и допустимите входни сигнали за кормилното устройство, налага наличието на съгласуваща електронна схема. Нейната главна функция е да отмести синусоидалния сигнал, с нулева средна стойност, получен на входа. В резултат на изместването, изходният сигнал е синусоидален сигнал със средна стойност $5V$, която съответства на неутрален управляващ сигнал за PVE модула.

Операционен усилвател ($TL071C$), обхванат с единична отрицателна обратна връзка, реализира входен буфер, който осигурява голямо входно съпротивление и малко изходно. Втори операционен усилвател реализира неинвертиращ суматор. Опорното напрежение $5V$ се получава от стабилизатор на напрежение $L7805$.



Фиг.3 Съгласуваща електронна схема.

Управляващото въздействие формирано от входното задаващо устройство се подава към съгласуващия модул, който от своя страна съгласува сигналите съответно от обратната връзка по преместване (R_{pos}) и заданието. Единият изход ($A0$) на контролера е свързан към електрохидравличният блок с 2/2 клапани (PVE), с цел подаване на управляващ сигнал по напрежение във вид на широчинно-импулсно модулиран (ШИМ, PWM) сигнал u_s към $EXKY$ (*OSPEC 200LSRM*). Другият ($A/3$) е свързан към съгласуващия модул и цифровия осцилоскоп. Въвеждането на програмното осигуряване на контролера и отчитането на динамични характеристики се осъществява чрез CAN-мрежа подчинена на стандарта. Компютърната система, която служи за работна станция (*Working Station*) има достъп до CAN-мрежата, посредством *USB/CAN*-кабелен преход (*CG150*) [2].

2. Планиране и реализация на експерименталните изследвания.

Експерименталните изследвания за целите настоящата работа са извършени на стенд за изпитване на $EXKY$. За целта стенда е приведен режим с отворена система за управление, при който входно задаващо устройство е сигнален генератор, генериращ синусоидални сигнали с честота $f = 0.1 \div 1.9\text{Hz}$. Този диапазон е избран на база на експериментални изследвания определящи честотната лента на системата.

Планиран е физически експеримент, при който променлив параметър е стойността на честотата на синусоидалния входен сигнал. Променливия параметър се изменя със стъпка 0.1 Hz в споменатия диапазон. Невъзможността за използване на по-малка стъпка е следствие от ограниченията във функционалните възможности на използвания генератор на сигнали.

Сравнението на получените експериментални честотни характеристики на изследваната система с тези, получени от съставените в предходна работа математични модели за идентификация, ще даде възможност тези модели да бъдат окачествени и приложени при оптимизацията на затворената система за управление. Тази оптимизация ще даде възможност да се обезпечат определени динамични свойства касаещи не само устойчивостта, но и бързодействието на системата. Това е и основния мотив за планирането и реализацията на експерименталните изследвания.

3. Построяване на честотните характеристики на системата.

При линейните системи, амплитудно-честотната характеристика, представлява отношението на амплитудата на изходния синусоидален сигнал, към амплитудата на входния синусоидален сигнал. Аналогично, фазово-честотната характеристика, представлява разликата между фазовото отместване на изходната синусоида и входната синусоида. Линейността на системата означава, че произволен входен синусоидален сигнал, подаден на входа, преминава в пропорционален изходен синусоидален сигнал, със същата честота. Познаването на честотната характеристика, позволява да се определи реакцията на системата при произволен входен сигнал, който е представим като сума от синусоидални съставящи. Освен това, сложни аритметични операции за времевата област, като например диференциране, интегриране, конволюция, се опростяват при представяне на сигналите и системата в честотната област.

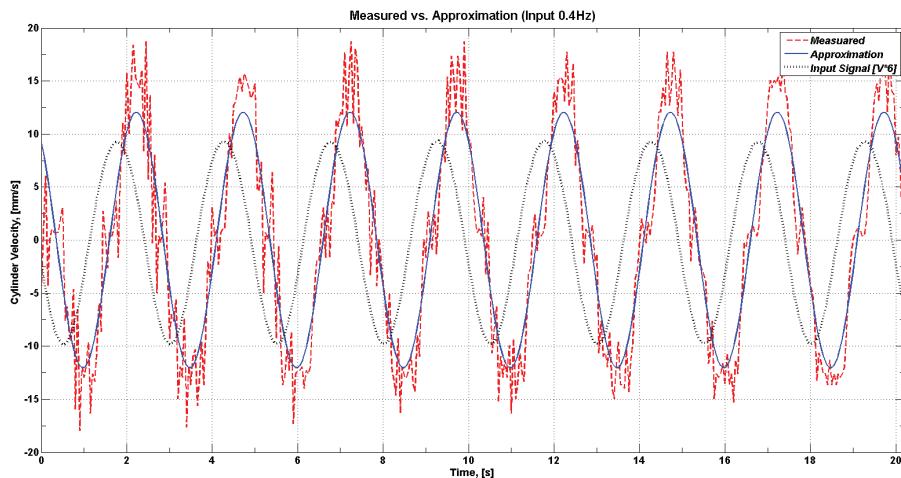
Нека е даден запис на входния сигнал x_t , $t = 1..N$ съдържащ N стойности. Неговата дискретна трансформация на Фурье $X(j\omega_d)$ се дава с израза:

$$X(j\omega_d) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t e^{j\omega_d t}, \quad \omega_d = \frac{2\pi k}{N} \quad (1)$$

Както е известно, дискретните сигнали имат периодичен спектър, чийто период се определя от честотата на дискретизация $F_0 = 1/T_0$. При проведените експерименти, $T_0 = 0.05\text{ s}$, $F_0 = 20\text{ Hz}$. Следователно спектъра на дискретния сигнал ще съдържа честотите от 0 до 10 Hz. Това е приемливо, тъй като най-високата честота на входния сигнал е 1.9 Hz. Така избраната стойност на F_0 ще осигури и добра разрешаваща способност.

Измерените синусоидални сигнали показани на Фиг.4, съдържат основен хармоник и шум. Затова е необходимо тяхното разделяне, което правим посредством дискретното преобразуване на Фурье. Първо определяме номера k_L на хармоника в дискретния спектър. Изчислява се отношението на честотата на хармоника f към максималната честота F_0 . Полученото отношение е дробно число, което се закръгля към по-малка стойност.

$$k_L = \text{floor}\left[\frac{f}{F_0} N\right] \quad (2)$$



Фиг.4 Апроксимация на отчетения синусоидален сигнал на изхода съпоставен с входния.

Разрешаващата способност в честотната област Δf зависи от дължината на извадката N . По-дълги извадки водят до определяне на по-голям брой честоти в спектъра. За да се гарантира присъствието на честота f в разложението се изчислява подходяща дължина на извадката N_1 . От условието $\Delta f = f$, определяме

$$N_1 = \frac{k_L F_0}{f} \leq N \quad (3)$$

Съответно комплексната амплитуда е

$$X_f = \frac{2}{N_1} \sum_{t=1}^{N_1} x_t e^{-j2\pi k_L t}, \quad (4)$$

където амплитудата на хармоника е $A_f = |X_f|$, а неговата фаза е $\varphi_f = \text{Arg}[X_f] + \frac{\pi}{2}$

$$x_a = A_f \sin(2\pi f t + \varphi_f) \quad (5)$$

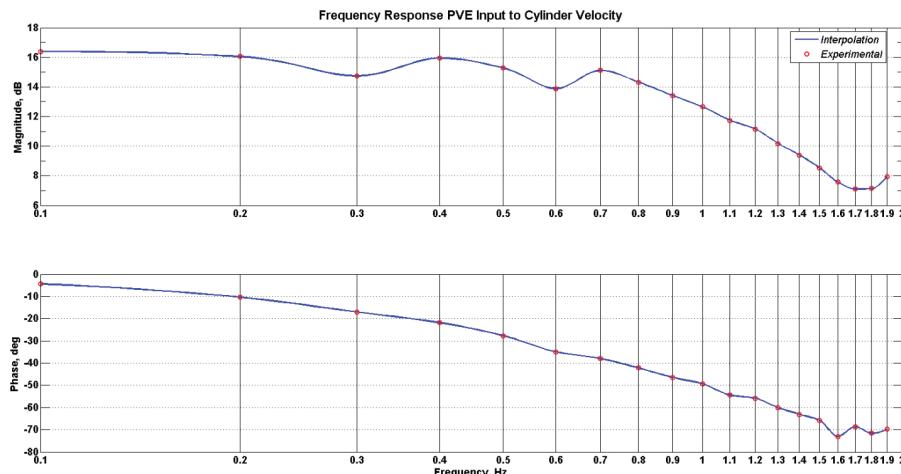
Аналогични операции се прилагат и върху записаните стойности за изходния сигнал, при което

$$y_a = B_f \sin(2\pi f t + \psi_f) \quad (6)$$

В резултат, амплитудно-фазово честотната характеристика се получава

$$W(j\omega) = \frac{B_f}{A_f} e^{j(\psi_f - \varphi_f)}, \quad \omega = 2\pi f \quad (7)$$

На Фиг.5 са показани логаритмичната амплитудно честотна (ЛАЧХ) и фазово честотна характеристика (ФЧХ), при които входен сигнал е този подаван на PVE модула, а изходен е скоростта на сервоцилиндъра. Амплитудно-фазовата характеристика (АФХ) в комплексната равнина е показана на Фиг.6.

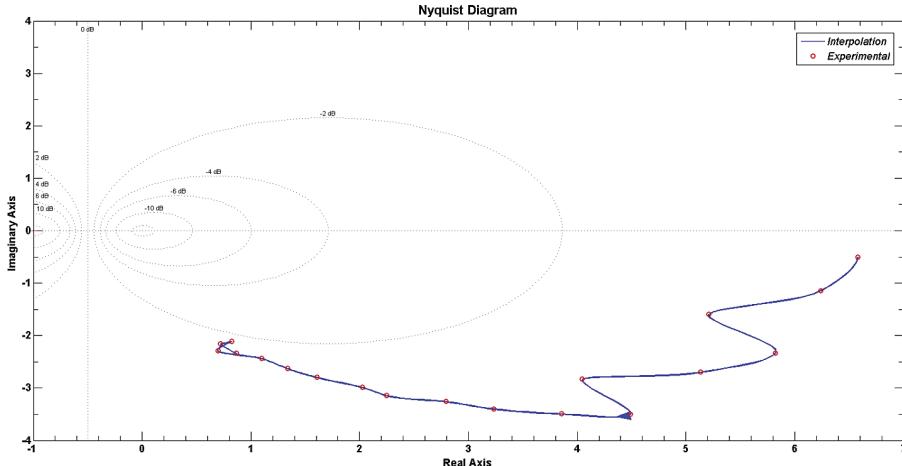


Фиг.5 ЛАЧХ и ФЧХ по скорост.

Честоти [Hz]: 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3
1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9

Кофициенти на усиливане [-]: 6.598 6.3439 5.4466 6.2718 5.801
4.9373 5.6945 5.2012 4.6889 4.2936 3.865 3.6101 3.2252 2.948
2.6724 2.3904 2.2648 2.2735 2.4939

Фазово отместяване [deg]: -4.3708 -10.3822 -17.0298 -21.7988 -
27.7002 -34.9733 -37.9865 -42.1986 -46.4249 -49.3764 -54.4366 -
55.8528 -60.0913 -63.0847 -65.7156 -73.0236 -68.6868 -71.6154 -
69.6484



Фиг.6 Амплитудно-фазова характеристика в комплексната равнина.

Получените честотни характеристики представляват непараметрични модели на обекта. Много методи за синтез използват параметрични модели. Те могат да бъдат изведени чрез оптимизационни подходи от непараметричните. Например за разглеждания в работата стенд, характеристиката се апроксимира добре с модел от първи ред $W_1(z)$. Най-висока точност на апроксимация се постига с модел от 15 ред $W_{15}(z)$.

$$W_1(z) = \frac{0.6594z + 0.8833}{z - 0.758} \quad (8)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експериментално получените честотни характеристики и техният анализ дават основание да се направят следните по-важни изводи:

1. Сръзващата честота на системата е около 1 rad/sec . В ниските честоти се забелязва променлива стойност на предавателния коефициент, което е следствие от характеристиките на хидравличните елементи, изграждащи системата (клапани, тръбопроводи, работна течност, инертност, свиваемост). Поради относително малкия брой снети точки от тази честотна област, вероятно са останали и някои немоделирани изкривявания на характеристиката.

2. При честоти по-големи от 2 Hz преместването на буталото на сервоцилиндъра е незначително дори и при максимална амплитуда на входния сигнал. С повишаване на честотата се увеличава и шума в измеренията изходен сигнал, голямата част от който се дължи на нелинейни ефекти в системата. Въпреки това отношението сигнал/шум (SNR) определя системата в изследвания диапазон с преобладаваща линейна динамика. Това е очаквано, като се има в предвид, че при тези системи по проект се залага да бъдат линейни.

3. Получените експериментални честотни характеристики ще послужат за сравнение на математичните модели за идентификация на изследваната електрохидравлична система с цифрово управление, което от своя страна ще послужи за синтез на системата за управление и окачествяването ѝ върху изследваната кормилна система.

Литература

- [1]. Митов, Ал., Експериментално изследване на влиянието на подпорните клапани в електрохидравлична кормилна система с цифрово управление, XX МНК „ЕМФ 2015“, Созопол, 2015.
- [2]. Митов, Ал., Ил.Ангелов, Система за цифрово управление на стенд за изпитване на електрохидравлични кормилни устройства, XX МНК „ЕМФ 2015“, Созопол, 2015.
- [3]. Ikonen, E., K. Najim, Advanced Process Identification and Control, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [4]. Isermann, R., M. Munchhof, Identification of Dynamic Systems, Springer, 2011.
- [5]. Ljung, L., System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall, 1999.

За контакти:

Маг. инж. Александър Стоянов Митов, Технически Университет – София,
Катедра Хидроаеродинамика и Хидравлични машини, 0886 208 937,
alexander_mitov@mail.bg

Маг. инж. Йордан Константинов Кралев, Технически Университет – София,
Катедра Системи и Управление, 0882 093 195, jkralev@yahoo.com

Проф. д-р инж. Илчо Иванов Ангелов, Технически Университет – София,
Катедра Хидроаеродинамика и Хидравлични машини, 0887 857 820, ilangel@tu-sofia.bg

Докладът е рецензиран.