

Честотен анализ на резултатите от идентификацията на електрохидравлична кормилна система с цифрово управление

Александър Митов

Frequency analysis of the results of the identification of electrohydraulic steering system with digital control: This paper is a comparative analysis of the frequency characteristics received from experimental studies and mathematical models for identification. Presented the practical and theoretical approaches with tools to obtain studied characteristics.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

Основно предимство на хидравличните задвижващи системи е високата плътност на предаваната мощност при относително компактни размери. Това е и основната причина за успешното им внедряване при реализацията на различни по предназначение позиционни системи. Наред с това, възможността за точно позициониране е предпоставка и за утвърденото им приложение в управлението на траекторията на тежки мобилни машини.

Навлизането на цифрово управление в хидравличните кормилни устройства дава възможност за подаване на управляващи въздействия от електронен интерфейс, предполагащ дистанционно управление. Това от своя страна въвежда трудно преодолими изисквания към системата за управление. Решаването на този проблем налага изследването на динамичното поведение на кормилните уредби с цифрово управление, което да даде основание за синтез на различни регулатори гарантиращи определени свойства при различни режими на работа.

В предходна работа [1] е извършена идентификация на хидравлична задвижваща система, в която основните звена са електрохидравлично кормилно устройство тип *OSPE 200* и двойнодействащ равнопложен сервоцилиндър. Идентификацията е изпълнена на база на експериментално отчетени динамични характеристики във вид на преходни процеси при движение на обекта за управление – хидравличен сервоцилиндър.

Основна цел на настоящата работа е сравнителен анализ на честотните характеристики получени съответно от физически експеримент и тези получени от математичните модели за идентификация. Този анализ на динамичното поведение на системата ще даде основание за синтез на регулатори въз основа на отделните модели и тяхното качествено сравнение върху експерименталната постановка.

1. Експериментални честотни характеристики.

Построяването на честотните характеристики на изследваната система е описано подробно в [2]. Те са получени на база на планиран физически експеримент, при който променлив параметър е стойността на честота на синусоидалния входен сигнал $f = 0.1 \div 1.9 \text{ Hz}$. Променливия параметър се изменя със стъпка 0.1 Hz в споменатия диапазон.

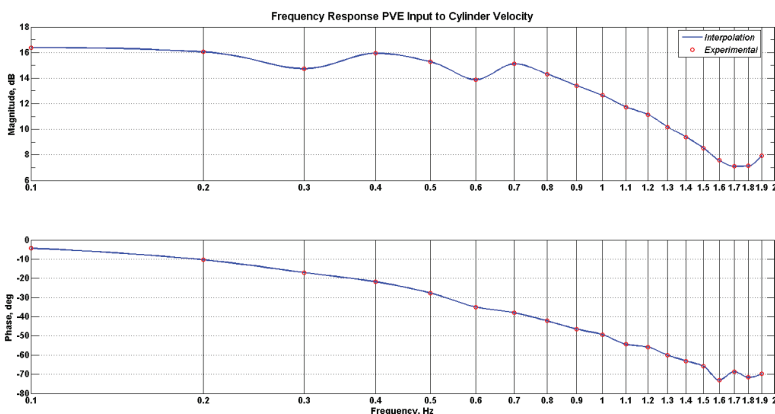
Уместно е да се отбележи, че измерените синусоидални сигнали, съдържат основен хармоник и шум. Затова е необходимо тяхното разделяне, което правим посредством дискретното преобразуване на Фурие. За целта на база на подробното математическо описание представено в [2] е разработен софтуер в средата на *MATLAB*, показан на Фиг.1.

На Фиг.2 е показана логаритмичната амплитудно честотна характеристика (ЛАЧХ) и фазово честотна характеристика (ФЧХ), при която входен сигнал е този подаван на *PVE* блока, а изходен е скоростта на сервоцилиндъра.

```

1  load freqOp4hs.mat
2  f1=0.4;
3  T0=0.05;
4  v=[0; diff(y)/T0];
5  ts=t/1000;
6
7  x=(u-mean(u))/1000;
8  k=f1*T0*length(x); kfl=floor(k); Lx=kfl/f1/T0;
9  x1=x(end-Lx+1:end); x1=x1-mean(x1);
10 t1=ts(end-Lx+1:end); t1=t1-t1(1);
11 c=2/Lx*sum(x1'.*exp(-1i*2*pi*kfl/Lx*(0:Lx-1)));
12 A0=abs(c); Ph0=(angle(c)+pi/2)*180/pi;
13 x2=A0*sin(2*pi*f1*t1+Ph0*pi/180);
14
15 v=(v-mean(v))/60;
16 k=f1*T0*length(x); kfl=floor(k); Lx=kfl/f1/T0;
17 x1=x(end-Lx+1:end); x1=x1-mean(x1);
18 u1=u(end-Lx+1:end); u1=u1-mean(u1);
19 t1=ts(end-Lx+1:end); t1=t1-t1(1);
20 c=2/Lx*sum(x1'.*exp(-1i*2*pi*kfl/Lx*(0:Lx-1)));
21 A1=abs(c); Ph1=(angle(c)+pi/2)*180/pi;
22 x2=A1*sin(2*pi*f1*t1+Ph1*pi/180);
23 plotyy(t1,x2,t1,u1);
24
25
26 K1=A1/A0;
27 P1=Ph1-Ph0
    
```

Фиг.1 Софтуер за разделяне на сигналите – хармоник и шум.



Фиг.2 ЛАЧХ и ФЧХ по скорост.

2. Резултати от идентификацията по преходни процеси.

Математическото описание на моделите за идентификация е представено подробно в [1].

Първият от съставените модели (Хамерщайн-Винер) за идентификация, представлява последователно съединение на линейна предавателна функция (пропорционално звено, интегриращо звено и чисто закъснение) и два статични нелинейни елемента (Фиг.3).

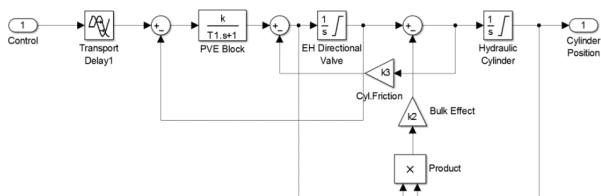


Фиг.3 Структурна схема на модел Хамерщайн-Винер.

Той е получен от директните наблюдения върху поведението на обекта. Числените стойности на параметрите са определени чрез подходящи експериментални измервания.

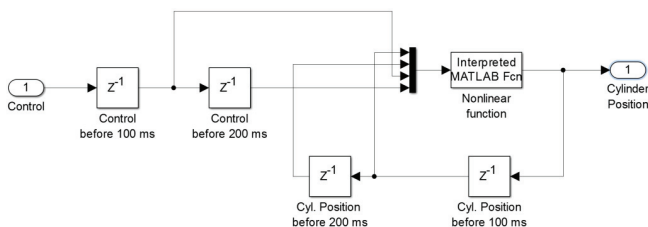
Вторият от моделите (Фиг.4) е получен като е използвана наличната

информация за конструктивните елементи, които изграждат кормилното устройство и PVE блока.



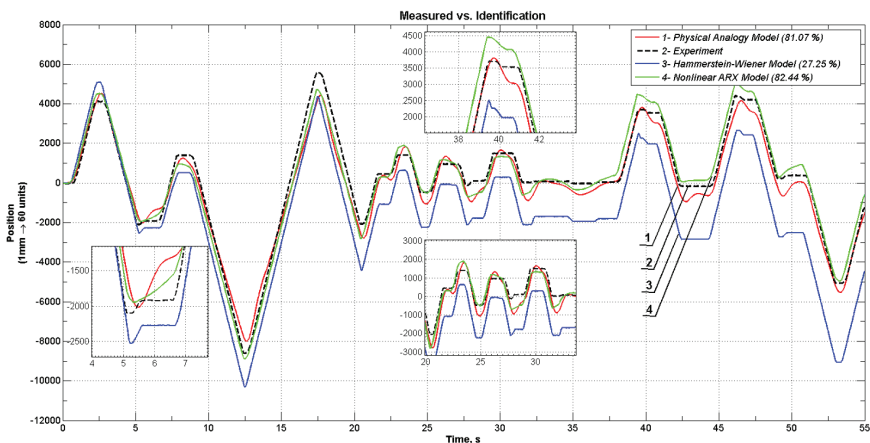
Фиг.4 Структурна схема на модел от физическа аналогия.

Третият от използваните модели е нелинеен ARX модел (Фиг.5), при който се пренебрегва априорната информация за конструкцията на системата и се отчита само неговото входно-изходно (функционално) поведение.



Фиг.5 Структурна схема на нелинеен ARX модел.

На Фиг.6 е показано сравнението на трите модела за идентификация във времевата област, както и пресметнатата в проценти степен на съвпадение.



Фиг.6 Сравнение на резултатите от моделите за идентификация с експерименталните данни.

3. Честотен анализ на резултатите от експеримент и идентификация.

Получените от идентификацията по експериментални данни модели са

нелинейни, а експериментално получените честотни характеристики допускат линейност на преобразуващата системата. Това противоречие се разрешава, имайки в предвид, че за използвания работен диапазон, механичната, хидравличната и електрическата подсистеми проявяват достатъчно близко до линейност поведение, за да се приложи метода за линеаризация по Тейлър. Тази ситуация е често срещана при техническите системи, имайки предвид че хората проектанти обикновено избират да използват линейни елементи за тяхното изграждане. Ако е дадена нелинейна система

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

$$y = g(x, u), \quad (2)$$

тогава съответната линейна система, за фиксирана работна точка

$x = 0, u = 0, y = 0$, се получава

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

$$y = Cx + Du, \quad (4)$$

където, матриците A, B, C, D съдържат стръмността на нелинейните функции f и g по съответни координатни направления (пространство на състоянията)

$$a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}, b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j}, c_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial x_j}, d_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial u_j} \quad (5)$$

За получените от идентификацията нелинейни модели, при изходен сигнал u положение на изпълнителния сервоцилиндър и входен сигнал u напрежение към PVE модула, съответните линеаризирани се получават:

Хамерщайн-Винер

$$A = 0, B = 2, C = 1.992, D = 0, \tau = 0.15s \quad (6)$$

Полученият линеен модел има едно състояние, което се изменя със скорост пропорционална на входния сигнал, без да зависи от текущата си стойност. Този модел включва и чисто закъснение, което при необходимост може да бъде апроксимирано, със зададена степен на точност, посредством въвеждане на допълнителни състояния.

Физическа аналогия

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.07466 & 16.42 \\ 0 & -1 & -3.295 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.333 \end{pmatrix}, C = (1 \ 0 \ 0), D = 0 \quad (7)$$

Полученият линеен модел е от трети ред. Входният сигнал въздейства върху стръмността на изменение на третото състояние, която зависи също така от текущата си стойност със стабилизиращ коефициент -3.295 и от текущата стойност на второто състояние. Второто състояние се изменя бързо под влияние на третото, съпосочно с него, с коефициент 16.42, а при $x_3 = 0, x_2$ затихва бавно с коефициент -0.07. Натрупаната стойност в x_2 води до бързо установяване на x_3 . От друга страна първото състояние, което определя директно изходния сигнал, расте със скорост равна на стойността на второто състояние. Може да се забележи, как второто състояние играе роля на обем за вътрешна енергия на системата, която от една страна подтиква въздействието на входния сигнал, а от друга определя нарастването на изходния сигнал.

Нелинеен ARX

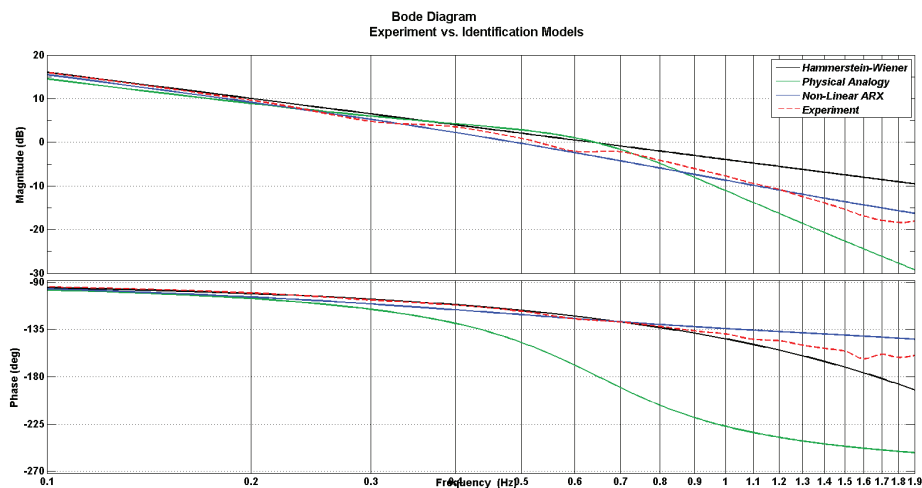
$$A = \begin{pmatrix} 1.683 & -0.6834 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0.8333 \\ 0 \end{pmatrix}, C = (0.2183 \ -0.0753), D = 0 \quad (8)$$

Този модел е получен при дискретизация на входните и изходните сигнали с такт $T_s = 0.1s$. Той е от втори ред. Изходният сигнал е правопрпорционален на първото и обратнопропорционален на второто състояние. Второто състояние

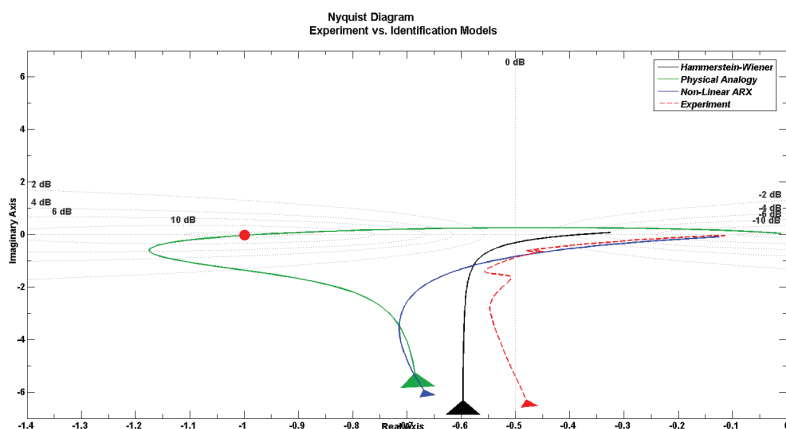
приема стойността на първото състояние, измерена $0.1s$, преди текущия момент. Първото състояние е право пропорционално на стойността си преди $0.1s$, на входния сигнал в текущия момент и е обратно пропорционално на стойността си преди $0.2s$. Двете състояние определят две противоположно действащи сили в системата – x_1 води до промяна на изходния сигнал в посоката на входния сигнал, а x_2 противодейства на тази промяна.

Линеаризацията на трите модела е извършена с използването на функцията *linearize* в средата на *MATLAB*, която се основава на метода на Тейлор.

Извършено е сравнение на линейните модели в честотната област, резултатите от което са показани на Фиг. 7 и Фиг. 8.



Фиг.7. Сравнение на честотните характеристики от експеримент и от моделите за идентификация.



Фиг.8 Сравнение на АФХ получени от експеримент и от идентификация - комплексна равнина.

Получените амплитудно-честотни характеристики пресичат границата от 0dB , съответна на коефициент на предаване 1.0 , около две точки (0.5 и 0.7 Hz). Ясно се вижда, че експерименталната честотна характеристика се доближава до 0dB , както при 0.5 Hz , така и при 0.7 Hz , предпоставка за което е наличието на форсиращ ефект в този диапазон. Освен това, експерименталната ЛАЧХ се доближава в най-голяма степен до съответната ЛАЧХ на нелинейния ARX модел, пресичайки я 4 пъти, без да се отклонява на повече от 5 dB . Най-голямото отклонение във ФЧХ на тези модели е около 20 градуса . Тази близост си проличава и на Фиг. 8.

Там е ясно, че разликата между двата модела се поражда от разлика в статичните коефициенти на усилване около $30\div 40\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на честотните характеристики получени следствие на експериментални и теоретични изследвания, може да се обобщи следното:

1. В нискочестотната област ($0.1\div 0.3\text{ Hz}$) всички математични модели за идентификация имат характеристики близки до тази на интегриращото звено. Това е очаквано, тъй като подаването на постоянен входен сигнал определя движение с постоянна скорост на изпълнителния сервоцилиндър в съответната посока.

2. В средночестотния диапазон ($0.4\div 0.8\text{ Hz}$) се проявяват разликите между моделите за идентификация, които се засилват във високочестотния диапазон ($0.9\div 1.9\text{ Hz}$). Най-близка до експериментално определената честотна характеристика е тази получена от линеаризацията на нелинейния ARX модел.

3. Особено голямо е изоставането по фазата при модела физическа аналогия, в сравнение с останалите модели. Това го определя като по-консервативен за целите на управлението, тъй като съответната затворена система ще е по-близка до неустойчивост (Фиг.8).

Литература

- [1]. Ангелов, Ил., Ал. Митов, Й. Кралев, Идентификация на хидравлична задвижваща система с електрохидравлично кормилно устройство и изпълнителен сервоцилиндър, НК „Сливен`2015“, ИПФ-Сливен, 2015.
- [2]. Митов, Ал., Й.Кралев, Ил.Ангелов, Експериментално изследване на честотни характеристики на електрохидравлична кормилна уредба с цифрово управление, НК РУ и СУ` 2015, Русе, 2015.
- [3]. Митов, Ал., Експериментално изследване на влиянието на подпорните клапани в електрохидравлична кормилна система с цифрово управление, ХХ МНК „ЕМФ 2015“, Созопол, 2015.
- [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

Докладът е рецензиран.