

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ХИДРАВЛИЧНА ЗАДВИЖВАЩА СИСТЕМА С ЕЛЕКТРОХИДРАВЛИЧНО КОРМИЛНО УСТРОЙСТВО И ИЗПЪЛНИТЕЛЕН СЕРВОЦИЛИНДЪР

Илчо АНГЕЛОВ¹, Александър МИТОВ², Йордан КРАЛЕВ³
alexander_mitov@mail.bg, jkralev@yahoo.com, llangel@tu-sofia.bg

¹ТУ – София, ЕМФ, катедра: „ХАД и ХМ“
гр. София, бул. “Климент Охридски” №8

²ТУ – София, ЕМФ, катедра: „ХАД и ХМ“
гр. София, бул. “Климент Охридски” №8

³ТУ – София, ФА, катедра: „С и У“
гр. София, бул. “Климент Охридски” №8

Резюме

В работата са представени резултати от последователно получени модели за идентификация, приложени върху експериментално отчетени преходни процеси на хидравлична задвижваща система състоящата се от две основни звена – електрохидравлично кормилно устройство (ЕХКУ) и изпълнителен сервоцилиндр. Отчитането на преходните процеси е извършено на база на предварително планирани за целите на идентификацията експериментални изследвания, реализирани на стенд за изпитване на ЕХКУ. Показани и анализирани са съставените от авторите множества от математични модели и техните структури. Представени са процесите на валидация на съответните модели чрез анализ на характерни показатели.

Ключови думи

хидравлична система, кормилно устройство, цифрово управление, идентификация, валидация

Въведение

Увеличаването на потребността от мобилни машини движещи се предимно в полеви условия, води до непрекъснатото развитие на основната задвижваща в тях система - хидравличната. Важен фактор при реализацията на хидростатични системи за мобилни приложения са хидравличните кормилни устройства за управление на траекторията, даващи възможност за управление на едно транспортно средство в няколко режима, в зависимост от начина на задаване на управляващо въздействие, а именно: механичен – чрез волан, електрически – чрез електронен джойстик и/или дистанционен – посредством GPS. Това развитие от своя страна разширява полето на приложение на хидравличните системи с цифрово управление, като дава възможност за директното им вграждане в управляващата верига на съвременен тип ЕХКУ, за което свидетелства утвърдилата се през последното десетилетие

технология PVE на фирмата Danfoss - вложена при ЕХКУ тип OSPE.

Именно тези фактори наред с навлизането на такъв тип машини не само по света, но и у нас, водят до нуждата от изучаването на такива устройства, не само с практически, но и с изследователски интерес.

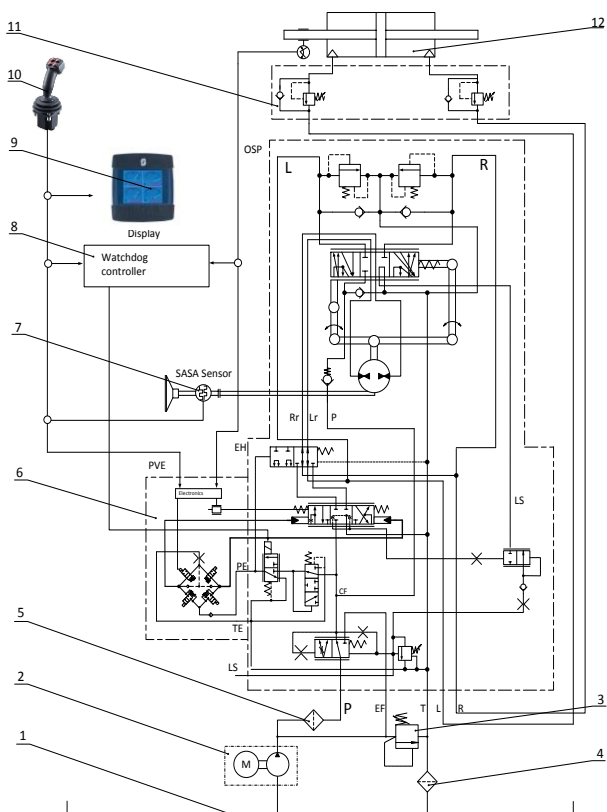
В настоящата работа е извършена идентификация на хидравлична задвижваща система, в която основните звена са електрохидравлично кормилно устройство тип OSPE 200 и двойнодействащ равноплощен сервоцилиндр. Идентификацията е изпълнена на база на експериментално отчетени динамични характеристики във вид на преходни процеси при движение на обекта за управление – изпълнителния сервоцилиндр. Последователно са реализирани: метод за идентификация чрез непрекъсната предавателна функция и нелинеен елемент на входа (модел от вида Хамерщайн-Винер), аналитичен метод въз основа на физическата аналогия и метод за

оценяване параметрите на нелинеен дискретен динамичен модел от вида ARX („авторегресия-пълзяща средна стойност“).

Основна цел на настоящата работа е да покаже структурата и възможностите на съставените за целите на идентификацията математични модели, както и процедурите свързани с тяхната валидация.

Постановка на експерименталната система

На Фиг.1 е показана хидравличната схема на стенда за изпитване на ЕХКУ, описана подробно в [Митов и др. 2014].

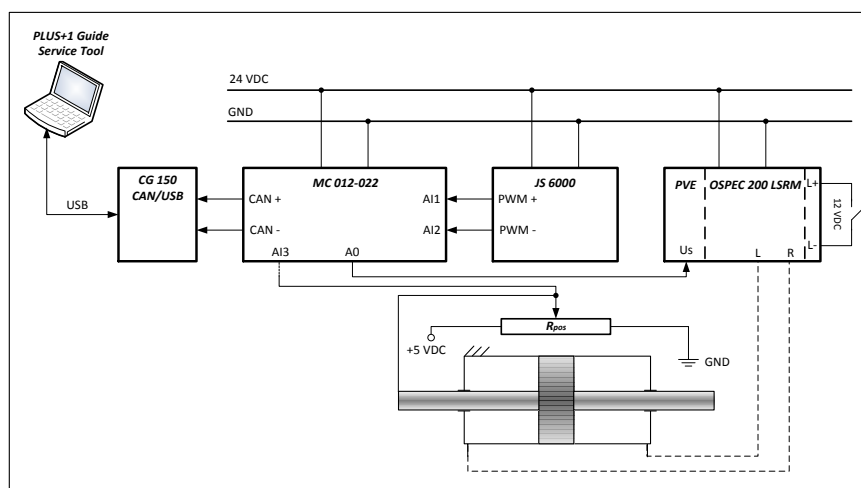


Фиг.1 Хидравлична схема на стенд за изпитване на ЕХКУ с натоварване по налягане.

Системата за цифрово управление е изградена на база на контролер тип MC012-022 и електронен джойстик тип JS6000, с помощта на който се управлява електропропорционалният блок PVE (вграден в ЕХКУ тип OSPEC 200), който чрез вграден разпределител (поз.6, Фиг.1) реализира управление на обекта – равнопложен сервоцилиндър. Принципната електрическа схема на свързване на компонентите изграждащи системата за управление е показана на Фиг. 2.

Управляващото въздействие формирано от входното задаващо устройство (джойстика) се подава във вид на ШИМ-сигнал (PWM) към контролера, който от своя страна разсъгласува сигналите съответно от обратната връзка по преместване (R_{pos}) и заданието. Единият изход на контролера е свързан към електрохидравличният блок с 2/2 клапани (PVE), с цел подаване на управляващ сигнал по напрежение на ЕХКУ (OSPEC 200LSRM). Въвеждането на програмното осигуряване и отчитането на динамични характеристики във вид на преходни процеси се осъществява чрез CAN-мрежа подчинена на стандарта описан в [2]. Компютърната система, която служи за работна станция има достъп до CAN-мрежата, посредством USB/CAN- кабелен преход (CG150) [Mitov et. al. 2015].

Реализиран е пропорционално-интегрален закон за регулиране на позицията у на буталото на изпълнителния сервоцилиндър. Параметрите K_p и K_i са избрани така, че да се постигне максимално бързодействие на затворената система, без пререгулиране. Такъв е най-характерния работен режим на този тип устройства. Затворената система с регулатора гарантира че входния сигнал към обекта за управление, принадлежи на множеството на работните сигнали.

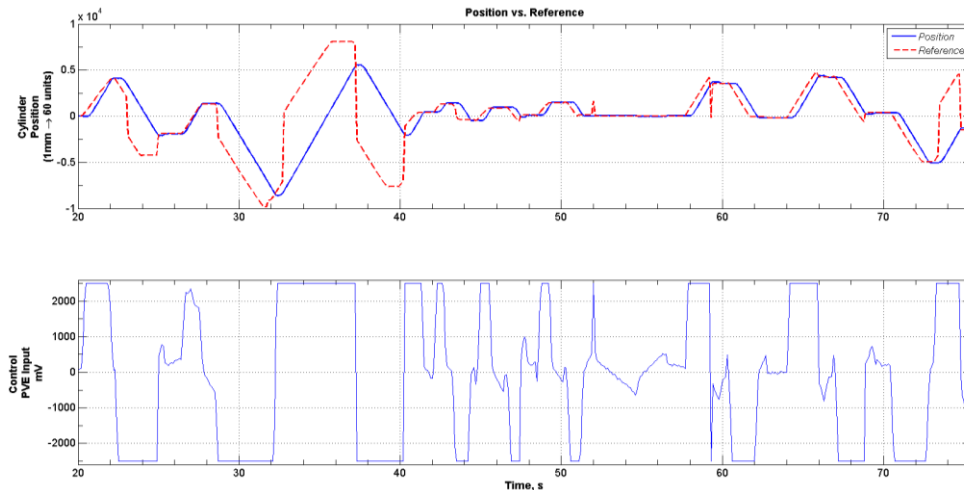


Фиг.2 Принципна електрическа схема на системата за управление.

Експериментални изследвания и идентификация

Експерименталните изследвания са извършени на стенд за изпитване на ЕХКУ представен подробно в [Митов и др. 2014]. За целта стенда е приведен в цифров режим, при който входно задаващо устройство е електронен джойстик. Системата за управление и функционалните възможности на стенда в този режим са представени в [Mitov et.al 2015].

Планирането на физическия експеримент, който да послужи като база от данни за идентификация на изследваната система е съобразено с изискванията да съдържа информация при движение в целия диапазон на хода на обекта (изпълнителния сервоцилиндър) при различни честоти на входния сигнал и при различни скорости на задаващото от джойстика въздействие.



Фиг.3 Експериментални данни за идентификация.

Хамерщайн-Винер

Първият от моделите за идентификация, който е приложен, представлява последователно съединение на линейна предавателна функция (пропорционално звено, интегриращо звено и чисто закъснение) и два статични нелинейни елемента (Фиг.4). Той е получен от директните наблюдения върху поведението на обекта. При подаване на входен сигнал се наблюдава зона на нечувствителност от вида:

$$F_{in}(x) = \begin{cases} 0, & |x| < 500 \\ x, & 500 \leq |x| < 2500 \\ 2500 \text{sign}(x), & |x| \geq 2500 \end{cases} \quad (1)$$

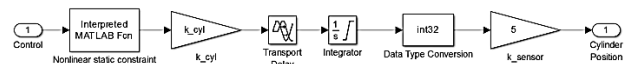
Управляващият сигнал u представлява електрическо напрежение. Неговата амплитуда е пропорционална на скоростта на буталото \dot{y} , което е аргумент за въвеждане на интегриращо звено. Наблюдава се и известно закъснение τ на реакцията, при стъпаловидно изменение на управлението.

$$y(t) = F_{out} \left(K \int_0^t F_{in}(u(t - \tau)) d\tau \right) \quad (2)$$

Геометричното движение на буталото е ограничено от тялото на цилиндъра, което е отчетено в модела като нелинеен елемент - ограничение.

$$F_{out}(x) = \begin{cases} x & |x| < 9000 \\ 9000 \text{sign}(x) & |x| \geq 9000 \end{cases} \quad (3)$$

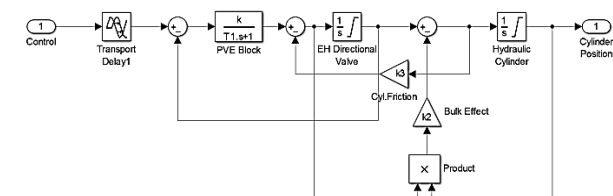
Числените стойности на параметрите са определени чрез подходящи експериментални измервания.



Фиг.4 Структурна схема на модел Хамерщайн-Винер.

Физическа аналогия

Вторият от моделите е получен като е използвана наличната информация за конструктивните елементи, които изграждат кормилното управление и PVE блока.



Фиг.5 Структурна схема на модел онагледяващ физически аналогия.

Както и в предходния случай, положението на изпълнителния цилиндър се получава от интегратор на скоростта му v_{cyl} .

$$y = F_{lim} \left(\int_0^t v_{cyl}(\tau) d\tau \right) \quad (4)$$

Скоростта v_{cyl} е пропорционална на преместването y_{servo} на вградения разпределител.

$$v_{cyl} = y_{servo} - k_2 v_{servo} \quad (5)$$

В допълнение на това, свиваемостта на работната течност, въвежда смущение $-k_2 v_{servo}$ върху скоростта, което се формира чрез нелинейна обратна връзка. Основанието ни за това е уравнението за свиваемостта $\frac{\Delta V}{\Delta P} = -KV$ за изпълнителния цилиндър. След разделяне на Δt , се получава $q = -KV\dot{P}$. Приемат се следните линейни зависимости: $q = K_q v_{cyl}$, $V = K_V y$, $P = K_P y_{servo}$. Следователно $v_{cyl, q} = -k_2 v_{servo}$, $k_2 = KK_P K_V / K_q$.

Вграденият разпределител се представя като интегриращо звено с насищане:

$$y_{servo} = F_{lim} \left(\int_0^t v_{servo}(\tau) d\tau \right) \quad (6)$$

Неговото преместване y_{servo} се управлява от вътрешна обратна връзка, затворена през PVE блока. Скоростта на вградения разпределител се образува от управляващия дебит на електрохидравличния блок u_{PVE} и смущение от съпротивителните сили на триене. Ако се отчете визкозното триене $F_v = -k_v v_{cyl}$, то ще се прояви върху факторите за формиране на дебита q_{cyl} , т.е. върху v_{servo} .

$$v_{servo} = u_{PVE} - k_3 v_{cyl} \quad (7)$$

Електрохидравличният блок е отчетен като апериодично звено с коефициент на усилване, т.е. като реален усилвателен елемент. Въведено е и закъснение τ_{el} , предизвикано от натрупаните закъснения на електрическите елементи.

$$\frac{d}{dt} u_{PVE} = -\frac{1}{T_1} u_{PVE} + k(u(t - \tau_{el}) - y_{servo}) \quad (8)$$

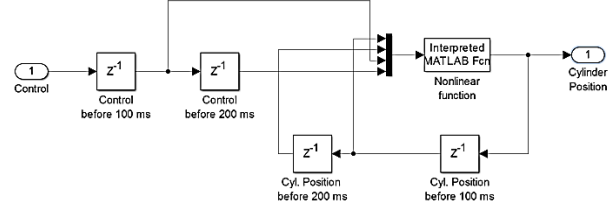
Стойностите на параметрите на този модел са определени чрез провеждане на оптимизационна процедура, която се стреми към минимум на функционал от претеглени стойности на грешката от модела.

$$J = \sum_{k=0}^{100} \left(y_{exp}(k T_S) - y(k T_S) \right)^2, \quad T_S = 0.1s \quad (9)$$

Експерименталните данни са разделени на две части – за идентификация (първите 100 точки) и за валидация (всички останали). Оптимизационната процедура работи само върху първата част от данните, а сравнението с останалите данни ни служи като критерий за приемане или отхвърляне на резултатите.

Нелинеен ARX модел

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



Фиг.6 Структурна схема на нелинеен ARX модел.

Преместването на изпълнителния цилиндър y се представя като нелинейна функция F_{tree} на четири променливи - две минали стойности на преместването и две минали стойности на управляващото напрежение.

$$y = F_{tree} \left(y(t - 0.1), y(t - 0.2), u(t - 0.1), u(t - 0.2) \right) \quad (10)$$

Нелинейната функция е формирана от множество линейни зависимости $(C_k \vec{x} + c_k)$ с различни дефиниционни области M_k .

$$F_{tree}(\vec{x} \in M_k) = d + (L + C_k) \vec{x} + c_k \quad (11)$$

$$k = 1 \dots N$$

Получените дефиниционните области са $N = 31$ на брой и образуват логическа структура на двоично дърво. То има 31 върха, всеки от които има по две разклонения (без последните). За всеки връх k може да се определи кой е левият l_k и кой е десният r_k елемент.

$$\forall k B_k \vec{x} < b_k \Rightarrow \vec{x} \in M(l_k) \quad (12)$$

$$\forall k B_k \vec{x} \geq b_k \Rightarrow \vec{x} \in M(r_k) \quad (13)$$

l_k – определя номера на елемента разположен в левия клон за връх k . r_k – определя номера на елемента разположен в десния клон за връх k . $M_k = M(k)$ е допустимо подмножество за нелинейната функция, за които отговаря връх k .

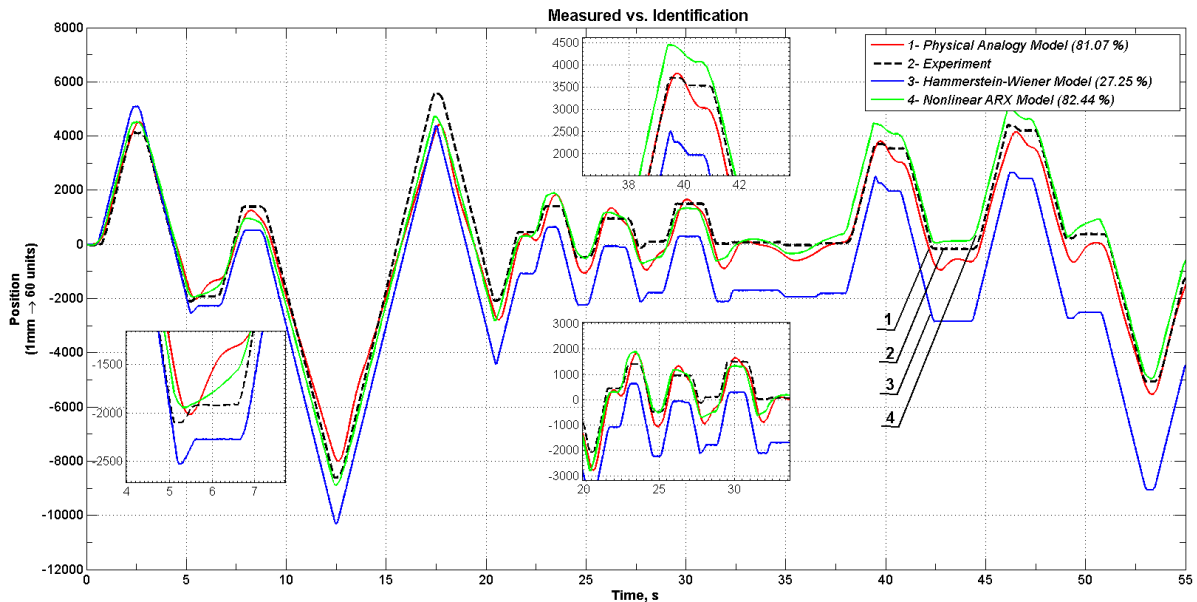
Обикновено входният вектор, принадлежи на няколко върха, т.е. $\vec{x} \in M_{i_1}, M_{i_2}, \dots, M_{i_z}$. За да се определи стойността на F_{tree} се изчисляват доверителните интервали $\Delta F_{tree}(\vec{x} \in M_{ik})$. Стойността на функцията се избира въз основа на най-малкия от тях.

$$\Delta F_{tree}(\vec{x} \in M_k) = \sqrt{\eta_k \vec{x}^T D_k \vec{x} \ln N^2} \quad (14)$$

$\eta_k = \sigma_k^2$ – дисперсия на грешката от линейната апроксимация в областта M_k . D_k – матрица от взаимните корелации на параметрите.

Нелинейната функция е определена въз основа на експерименталните данни, чрез командата на MATLAB *nlrx*. Тя използва

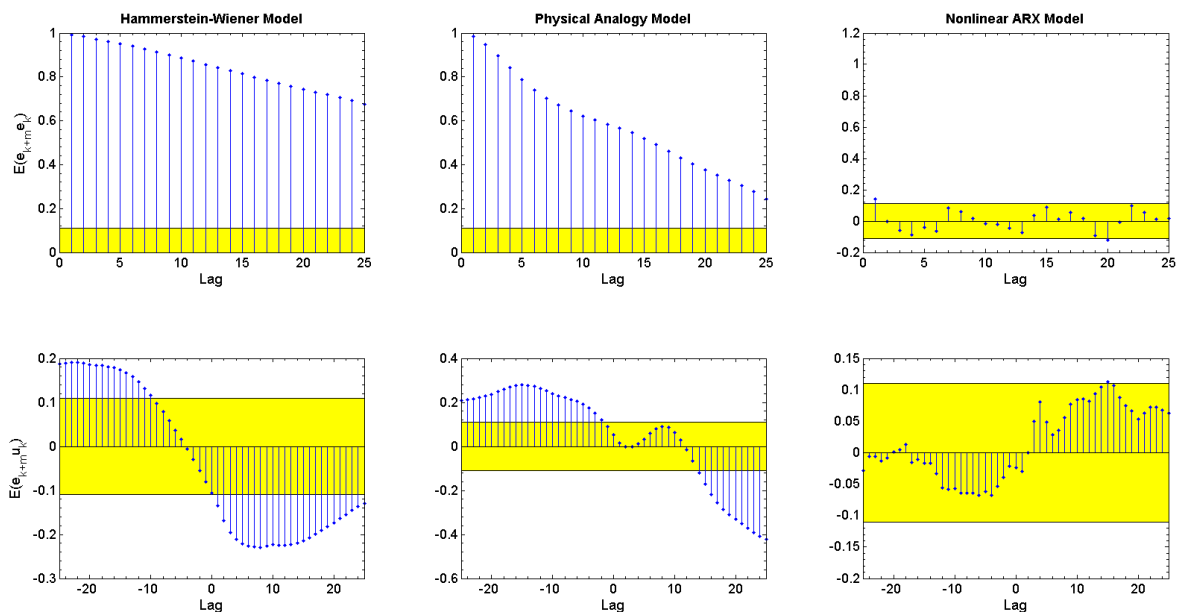
итеративен алгоритъм, при който първият връх обхваща цялата дефиниционна област, а всяко разклонение на дървото съответства на разделяне на дефиниционната област M_k на две чрез хиперравнина с нормален вектор B_k .



Фиг.7 Сравнение на резултатите от моделите за идентификация и експерименталните данни.

На Фиг. 7 е показано сравнението на трите модела за идентификация във времевата област. Изчислена е степента на съвпадение на реакцията на модела спрямо експерименталните данни съгласно израза:

$$FIT = 100 \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|_2}{\|y - E(y)\|_2} \right) \quad (15)$$



Фиг.8 Корелационни характеристики на грешката от моделиране.

На Фиг.8 са изобразени корелационни характеристики на грешката от моделиране $e = y - \hat{y}$. С жълт цвят е обозначена статистическата граница, под която се изпълнява хипотезата за липса на корелация

(при апроксимация с нормално разпределение на грешката). Моделът извлича максимална информация за обекта от данните, ако \hat{y} е ортогонална проекция на y върху пространството на регресорите (измерени или

преобразувани данни), т.е. ако $\hat{y}_k = E(y_k|u_{k-m}) \Rightarrow E(e_k\hat{y}_{k-m}) = 0$ и $E(e_k u_{k-m}) = 0$. В допълнение на това, при еднаква условна плътност на разпределението на изходната величина на модела и обекта, грешката има характер на бял шум $E(e_k e_{k-m}) = 0$.

Изводи

Въз основа на извършената поетапна идентификация на изследваната в настоящата работа система, можем да обобщим следното:

1. Извършена е идентификация на хидравлична задвижваща система, състояща основно от ЕХКУ и равнопощен сервоцилиндър, посредством три нелинейни модела. Данните за идентификацията са получени на база на
2. планиран за тази цел експеримент във вид на преходни процеси.
3. След валидация на съставените модели е установено, че и с трите структури е

възможно да се премине към синтез на оптимално управляващо устройство. Въпреки това, нелинейният регресионен ARX модел постига най-добра близост (82.44 %) по отношение на динамиката (Фиг.7) и статистическите характеристики (Фиг.8) на грешката от моделиране.

4. Така съставените модели за идентификация съдържат относително ниска степен на нелинейност, което позволява да се извърши линеаризация и да послужи за изследване и директен синтез на честотните свойства на конкретната система.

Настоящата работа е извършена в изпълнение на договор за подпомагане на докторанти №142ПД0063-02/28.03.2014г, Финансиран от ТУ-София, НИС за 2015г.

ЛИТЕРАТУРА

Гарипов, Е., Идентификация на системи, ТУ-София, 2007.

Митов, Ал., Ил.Ангелов, Н.Станчев, Стенд за изпитване на електрохидравлични кормилни управления тип OSPE 200, МНК „ПУ и СУ“ 2014, Русе, 2014.

Greblicki, Wł., M. Pawlak, Nonparametric System Identification, Cambridge University Press, 2008.

Ljung, L., System Identification: Theory for the User, Second Edition, 1999.

Mitov, Al., Il. Angelov, J. Kraleв, Digital Control of Electro-Hydraulic Steering Test Bench, ISC “MAHVP`2015”, Pamporovo, 2015.

IDENTIFICATION OF HYDRAULIC DRIVE SYSTEM WITH ELECTROHYDRAULIC STEERING UNIT AND SERVOCYLINDER

Il. Angelov, Al. Mitov, J. Kraleв

Resume

The work presents the results obtained by sequential patterns of identification applied to the experimentally reported transient response hydraulic drive system consisting of two main units - electrohydraulic steering unit (EHSU) and executive servocylinder. Reporting of transients responses is made on the basis of pre-planned for identification purposes experimental studies carried out on test bench EHSU. Below are compiled and analyzed by the authors sets of mathematical models and their structures. Presented the processes of validation of the models by analyzing the typical indicators.

Key Words

Hydraulic System, Steering Unit, Digital Control, Identification, Validation