

## Хидравлична задвижваща система с включен дискретен ПИД регулатор и импулсна модулация

Илчо Ангелов, Александър Митов, Йордан Кралев

*Hydraulic drive system with included a discrete PID controller and pulse modulation: This paper presents hydraulic drive system with a closed loop discrete PID controller and impulse modulation. Presented the structure of the regulator after its inclusion in known previous studies, the experimental system. Displayed and analyzed its performance based on the obtained transition characteristics.*

**Key words:** Hydraulic System, Closed Loop, PID, Discrete

### ВЪВЕДЕНИЕ

За успешната реализация на системите за автоматично управление (САУ) със структурно определен цифров регулатор свидетелстват приложенията им при автоматизацията на редица технологични процеси. Обикновено обектът за управление има непрекъснат характер, което налага при проектирането на цифровата САУ изходният сигнал  $y(t)$  и желаното задание  $r(t)$  да се дискретизират с постоянен такт  $T_0$ , посредством аналого-цифров преобразувател (АЦП). Така приведените в цифров вид величини  $y(k)$  и  $r(k)$  участват в алгоритъма на управлението, реализиран в дискретния регулатор. От друга страна, за да се формира непрекъснато управляващо въздействие като входен сигнал на обекта, се извършва конвертиране на изхода на регулатора, чрез ЦАП. При управление на технологични процеси това обикновено се постига чрез поддържане на постоянна стойност на възстановената в непрекъснат вид величина в рамките на използвания вече такт на дискретизация [3].

Имайки в предвид областта на приложение на хидравличните задвижващи системи и обхвата им при реализиране, както на относително малки, така и на големи мощности, може да се съди за непрекъснатото им развитие по посока на цифрово управление, с цел постигане на ефективност и оптимални работни условия. На този етап тези хидравлични системи с цифрово управление условно са ограничили своя периметър в индиректното управление на по-големи устройства и системи. Те се състоят най-вече от сравнително малки по типоразмер 2/2 или 3/2 бързопреключващи клапани свързани в паралел и управлявани в голяма част от случаите на принципа на широчинно-импулсна модулация и нейните разновидности.

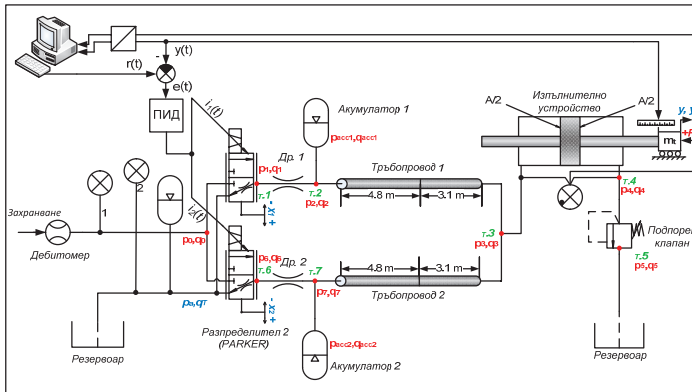
В следствие на поредица от симулационни изследвания [1,2] на експериментална постановка с изпълнително устройство задвижвано посредством два трипътни двупозиционни разпределителя захранвани в паралел, към всеки от които е свързан тръбопровод, в настоящата работа се разглежда експериментална постановка с включен ПИД-регулатор и импулсна модулация с фиксирана честота.

Основна цел на настоящата работа е да се покаже една възможност за управление на разглежданата в предходни работи хидравлична система при управление по затворен контур с дискретен ПИД регулатор, като показва неговата структура и възможности. Анализът на потенциалните възможности и поведението на регулатора е извършен въз основа на симулационни преходни характеристики от реакцията (преместването) на изпълнителното устройство по време на следене на предварително съпаловидно задание.

### 1. Схема и постановка на експерименталната система.

На Фиг.1 е показана схема на експерименталната система описана по-подробно в [1]. За целите на настоящата работа в системата е включен дискретен ПИД регулатор. Той е присъединен в обратната връзка след суматора разсъгласуващ сигналите съответно от датчика отчитащ преместването на изпълнителното

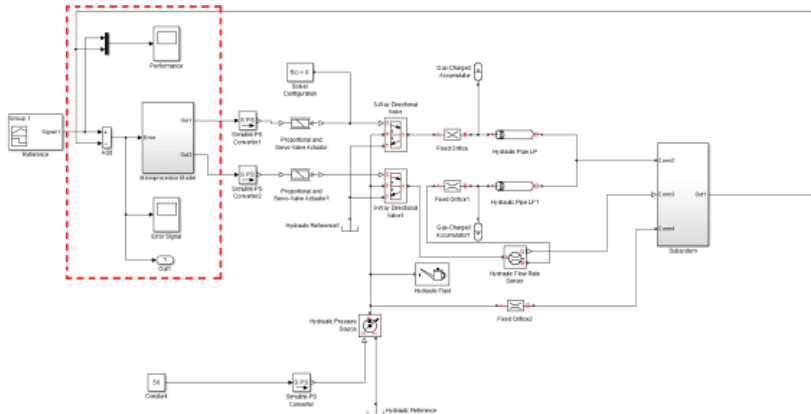
устройство  $y(t)$  и сигнала  $r(t)$  получен от входното задание. Входен сигнал за ПИД регулатора е получената грешка  $e(t)$ , в следствие на разсъгласуването на споменатите два сигнала.



Фиг.1 Схема на експерименталната постановка.

## 2. Нелинеен симулационен модел на затворената система за управление.

На Фиг. 2 е показана структурната схема на известен от предходни изследвания нелинеен симулационен модел на изследваната експериментална система, състояща се от основен модел и подсистема (Subsystem), реализирани в средата на Matlab/Simulink. Въз основа на този модел е структурирана затворената система за управление базирана на дискретен ПИД регулатор с импулсна модулация. Подсистемата обединяваща системата за управление включена в обратна връзка е оградена с червен цвят на Фиг.2.



Фиг.2 Структурна схема на основния модел в Simulink.

Математичният симулационен модел на динамичното поведение на изследваната система е съставен на база на следните основни зависимости [1] изведени съгласно избраните характерни точки и въведените основни хидравлични величини означени на Фиг.1:

- Уравнение на непрекъснатост в т.1.

$$q_{I(t)} = q_0 - q_{T(t)} = \mu(h_0 + x_{I(t)})b\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{0(t)} - p_{I(t)})} - \mu(h_0 - x_{I(t)})b\sqrt{\frac{2}{\rho}p_{I(t)}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

където:  $b \leq \pi d$ , m; d - диаметър на регулиращия елемент на разпределителя, m;  $h_0$  - припокриване между регулиращия елемент и съответните работни канали, m;  
 $-h_0 \leq x \leq h_0$

$\mu = 0,62$  - коефициент на дебита,  $\rho$  - налягане в съответната точка, МРа;  $q$  – дебит в съответната точка, l/min;  $\rho$  – плътност на работната течност, kg/m<sup>3</sup>;  $x$  – текущото преместване на регулиращия елемент на съответния разпределител, m;

➤ Уравнение на равновесие на силите.

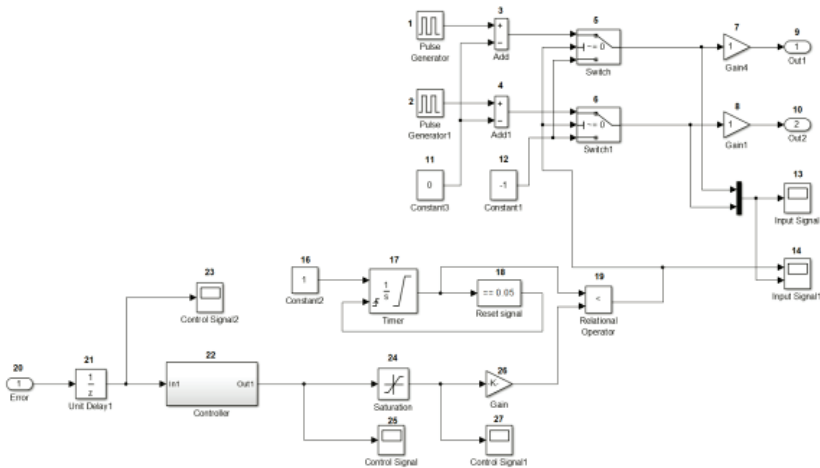
$$\frac{A}{2} \cdot p_{3(v)} = \frac{A}{2} \cdot p_{4(v)} + F, \quad m_{np.} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum F_i, \quad \text{N} \quad (2)$$

На Фиг.4 е показана подробна структурна схема на системата за управление. Обектът на управление има за изход – позиция на буталото на цилиндъра  $y(t)$ ; и за вход – налягане  $p(t)$  и дебит  $q(t)$  определен от позицията на разпределителите, която задаваме чрез електрически сигнали  $i_{1,2}(t)$ .

Електрическият сигнал  $i_{1,2}(t)$  подаван на изпълнителните клапани се генерира от хибридна система (Фиг.3) на 3 нива:

1. Регулатор изчислява аналогов управляващ сигнал  $u(kT_{PID})$  в дискретни моменти от време  $t = kT_{PID}$ , чрез дискретен ПИД алгоритъм от вида:

$$u(kT_{PID}) = K_p e(kT_{PID}) + K_i \sum_{m=0}^k e(mT_{PID})T_{PID} + K_D \frac{e(kT_{PID}) - e((k-1)T_{PID})}{T_{PID}}, \quad k \in Z^+ \quad (3)$$



Фиг.3 Структурна схема на управлението в Simulink.

Избран е такт на дискретизация  $T_{PID} = 0,01 \text{ sec}$ . Входният сигнал  $e(t) = r(t) - y(t)$  представлява грешката от задание на системата. Изходният сигнал има мерна единица - “% запълване на импулсите”, при което  $0 \leq u(t) \leq 100$ . Стойността на сигнала  $u$ , е дефинирана за всяко  $t$ , като:

$$u(kT_{PID} + \tau) = u(kT_{PID}), \quad \tau \in [0, 1) \quad (4)$$

2. Аналоговият управляващ сигнал  $u(t)$  се преобразува в широчинно-

импулсно модулиран сигнал  $x(t)$ :

$$x(t) = \begin{cases} 1, & z(t) < 0.01T_s u(t) \\ 0, & z(t) \geq 0.01T_s u(t) \end{cases} \quad (5)$$

За целта се използва периодичен трионообразен сигнал с период  $T_s = 0,05 \text{ sec}$ .

$$z(t) = z(t + T_s), \quad z = t, \quad t \in [0, T_s] \quad (6)$$

3. Логическото ниво на ШИМ-сигнала  $x(t)$  превключва изходите  $i_{1,2}(t)$  между два изпълними от клапаните сигнали - импулсно отваряне и затваряне в положителна посока с честота 80 Hz ( $p_{80Hz}(t)$ ) и константно отваряне в обратна посока (-1).

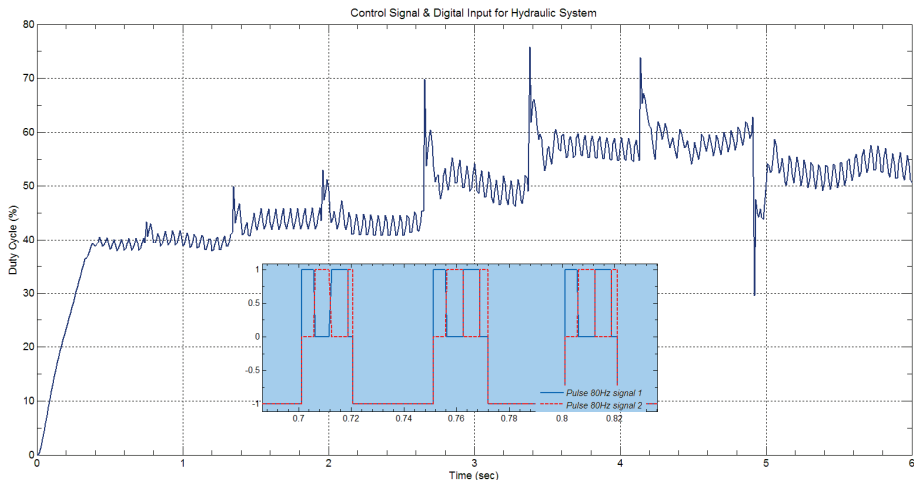
$$i_1(t) = \begin{cases} p_{80Hz}(t), & x = 1 \\ -1, & x = 0 \end{cases} \quad i_2 = \begin{cases} p_{80Hz}(t - \tau_{50\%}), & x = 1 \\ -1, & x = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Така се удовлетворяват технологичните изисквания относно работата на регулиращите клапани.

### 3. Анализ на потенциалните възможности на ПИД регулатора за разглежданата система.

За да управляваме позицията на изпълнителното устройство, може да се приеме че  $q(s) = f(i_1, i_2) = \frac{K_q}{T_q s + 1} e^{-s\tau_q} u(s)$ . Времонеконстантата  $T_q$ , и закъснението  $\tau_q$  отчитат динамиката на хидравличните процеси в тръбопроводите, както и преобразуването на управляващия сигнал  $u(t)$  в импулсните поредици  $i_{1,2}(t)$ . Дебитът  $q(t)$  е пропорционален на скоростта на буталото, поради което  $y(s) = \frac{1}{T_c s} q(s)$ . Следователно може да се приеме, че на обекта за управление съответства следната линейна структура:

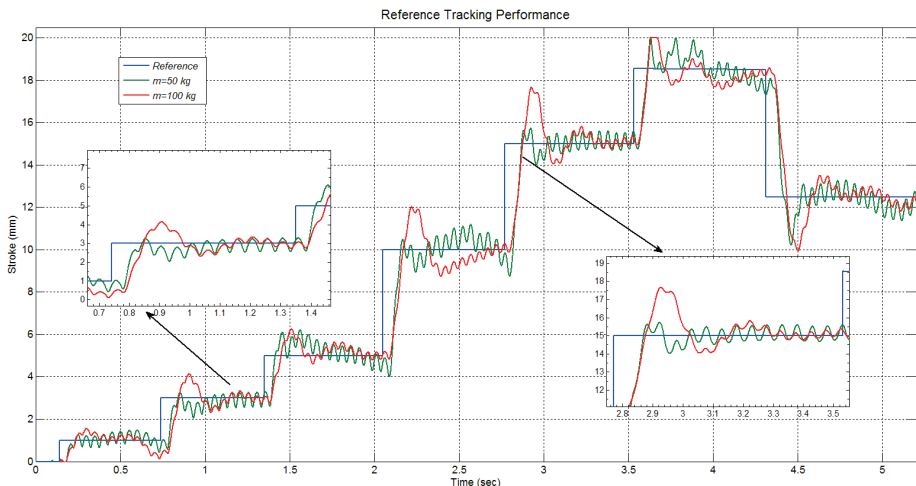
$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_q}{T_c s (T_q s + 1)} e^{-s\tau_q} \quad (8)$$



Фиг.4 Управляещ сигнал от ПИД регулатора при дискретен входен сигнал.

Параметрите  $p = (K_q, T_q, \tau_q)$  зависят от работната точка. Използването на ПИД закон за управление е оправдано, ако измененията на тези параметри не са значителни  $\Delta p < \alpha$ . Обекта включва интегратор, затова използването на I съставката на регулатора, е добре да се съчетае с включване и на D съставка. P съставката ще определя бързодействието на системата. PID регулатора определя 2 нули. Едната от тях ще служи, за да ограничи честотно I съставката, с оглед запазване на устойчивостта, а другата нула може да се настрои да компенсира полюса на обекта ( $-\frac{1}{T_q}$ ). Такава компенсация ще подобри бързодействието на преходните процеси, но ще доведе до увеличаване на амплитудата на управляващите въздействия и е възможно да влоши устойчивостта на системата.

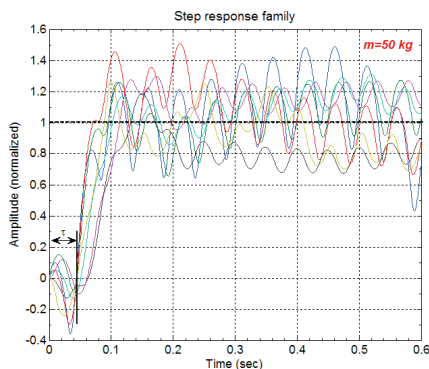
На Фиг.4 са показани управляващият сигнал от ПИД регулатора и модулираният, входен за регулатора, дискретен сигнал. За всички работни точки, управляващият сигнал остава в рамките на ограниченията  $[0 \div 100\%]$ . Така на дискретизация е избран достатъчно малък, така че пулсациите в изхода да се отразяват в управляващия сигнал. Така се дава възможност на регулатора да се опита да им въздейства. Тези пулсации всъщност са некомпенсируеми с линеен регулатор, тъй като техния произход е в нелинейния (ключов) механизъм, използван за генериране на управляващите импулси.



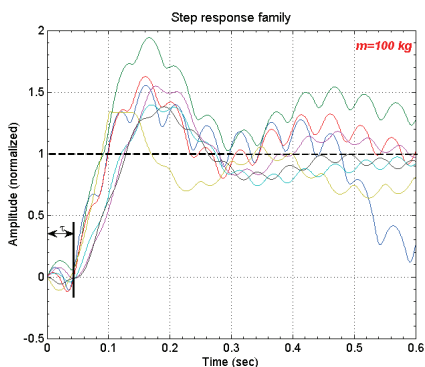
**Фиг. 5** Преходни процеси от реакция на изпълнителното устройство при зададено входно задание.

Извършени са симулационни изследвания отразяващи поведението на регулатора, респ. на системата. Тези изследвания са реализирани при стъпаловидно задание (показано със син цвят на Фиг.5) в смисъла на различни произволни позиции на управляваното изпълнително устройство в предварително приетият интервал  $[5 \div 20\text{mm}]$  съгласно [1]. Показана е реакцията на изпълнителното устройство при две стойности на външния товар под формата на подвижна маса, съответно при 50 и 100kg – без промяна на настройките параметри на регулатора. Изборът на този променлив параметър е в следствие от неговия лимитиращ характер, както за повечето динамични системи, така и за конкретно

разглежданата. В този аспект от показаните на Фиг.6 преходни характеристики следва, че повишаването на масата води едновременно до ясно изразено пререгулиране и потискане, респ. филтриране на пулсациите при навлизане на преходната характеристика в коридор на затихване, което от своя страна е показател за повишаване на качеството на регулиране. Освен това от показаните на Фиг.6 и Фиг.7 преходни характеристики в нормализирани интервал, се наблюдава запазване, както на времезакъснението  $\tau$  и бързодействието, така и на характера на преходните процеси при всяка от двете фамилии, съгласно променливия параметър.



Фиг.6 Фамилия преходни характеристики в нормализирани интервал - маса 50kg.



Фиг.7 Фамилия преходни характеристики в нормализирани интервал - маса 100kg

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на извършения анализ на структурата и потенциалните възможности на разглеждания в настояща работа ПИД регулатор, може да се обобщи следното:

1. Структурирана е система за управление базирана на ПИД регулатор с импулсна модулация от тип ШИМ, даваща възможност за управление на позицията на хидравлично изпълнително устройство чрез дискретен (цифров) сигнал.

2. Анализът на потенциалните възможности на разглежданата в настоящата работа ПИД структура показва, че регулатора изменя управляващото си въздействие в интервала на ограниченията  $[0\pm 100\%]$  за всички работни точки, като запазва устойчивостта и качеството на регулиране на системата при едни и същи параметри на неговите съставки.

3. Извършеният в настоящата работа анализ на поведението на дискретния ПИД регулатор, ще послужи като база за по-нататъшни изследвания насочени към идентификация на затворената по управление хидравлична задвижваща система, с цел получаване на честотните и характеристики и синтез, както на структурата на управлението, така и на изпълнителната и част.

## Литература

- [1] Ангелов, И., Ал. Митов, Оценка качеството на регулиране при изследване на преходни процеси на изпълнително устройство в хидравлична система с цифрово управление, ТУ-София, ЕМФ-2013, Созопол, 2013.
- [2] Ангелов, И., А.Митов, Й.Кралев, Идентификация на хидравлична задвижваща

система с цифрово управление на изпълнителното устройство, НК Сливен`2014.

[3] Гарипов, Е., Цифрови системи за управление, Техника, София, 2007г.

[4] Sell, N., N. Johnston, A. Plummer, S. Kudzma, *Control Of A Fast Switching Valve For Digital Hydraulics*, SICFP`2013, Linköping, Sweden, 2013.

**За контакти:**

Доц. д-р инж. Илчо Иванов Ангелов, Технически Университет – София, Катедра Хидроаеродинамика и Хидравлични машини, 0887 857820, ilangel@tu-sofia.bg

Маг. инж. Александър Стоянов Митов, Технически Университет – София, Катедра Хидроаеродинамика и Хидравлични машини, 0886 208937, alexander\_mitov@mail.bg

Маг. инж. Йордан Константинов Кралев, Технически Университет – София, Катедра Системи и Управление, 0882 093195, jkrallev@yahoo.com

**Докладът е рецензиран.**