

УПРАВЛЕНИЕ НА ДВУМЕРЕН ОБЕКТ С ПИД ЗАКОН И ДЕКУПЛИРАЩА МАТРИЦА ПРИ НЕИЗВЕСТЕН МОДЕЛ НА ОБЕКТА

TITO PID CONTROL USING DECOUPLING FILTER WHEN PROCESS MODEL IS UNKNOWN

Б. Раков, Г. Ружеков

Technical University of Sofia, Department of Systems and Control, Kl. Ohridski St., Sofia 1000, Bulgaria, e-mail: brakov@tu-sofia.bg g_ruzhekov@tu-sofia.bg

Abstract: Typically, in industrial systems, objects have more than one input and one output. These objects can hardly be controlled with ordinary PID regulators. Many of these objects have two inputs and two outputs (TITO). A method for control such objects with a PID regulators is provided in this publication

Keywords: PID control, MIMO Systems, PLC, SCADA, Decoupling filters

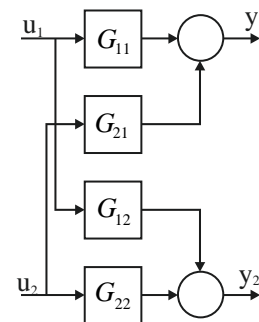
ВЪВЕДЕНИЕ

Въпреки наличието на голям брой методи за синтез на многомерни управляващи устройства, ПИД законът продължава да доминира в индустриалните системи. Това е наложено от неговата проста структура, малък брой параметри за настройка, наличието на утвърдени методи за настройка и самонастройка, познати на инженерите. Големият напредък в областта на цифровата техника и изчислителните системи, отварят нови възможности за реализация на алгоритми за автоматична настройка. Използването на едномерни ПИД регулатори за управление на обекти с много входове и изходи е затруднено от кръстосаните връзки в обекта, фиг. 1. Този ефект влошава тяхното качество и може да доведе дори до неустойчиви преходни процеси. За преодоляване на тези проблеми методите за настройка, трябва или да отчитат наличието на свързаност на етапа на синтеза или да се стремят към елиминирането им чрез редица подходи. В литературата могат да се намерят някои интересни методи. Методи с донастройка (*detuning*), методи с последователно затваряне на контурите (*Sequential Loop Closing*), релейни методи, независим синтез, директен синтез, ефективен отворен контур, методи използващи декупиращи филтри, оптимални методи, използващи съвременната H_2/H_∞ теория и т.н. В настоящия труд е използван метод с декупиращ филтър.

ДЕКУПЛИРАЩИ ФИЛТРИ

Както вече бе споменато в изложението, основен проблем при управление на многомерни обекти е наличието на свързаност между отделните контури. Елиминирането на тези ефекти опростява многомерната задача до N на брой едномерни. Това е основната идея на декупиращите филтри. Различни форми представляват, статично развързване на контурите, динамично декупиране за определен честотен диапазон или пълна компенсация на кръстосаните връзки. Очевидно пълна компенсация представлява едно строго и идеализирано изискване. Използването на този подход при системи с повече от два входа и два изхода е свързано с обратна предавателна матрица на обекта [1]. Обръщането на предавателни

матрици е не лека задача. Съществува частно решение за двумерни системи, което избягва употребата на обратна матрица. Поради това използването на компенсаторни елементи при двумерни обекти е оправдано. Нека обектът от фиг. 1 се описва с предавателна матрица $G(s)$, съдържаща строго правилни и устойчиви предавателни функции $G_{ij}(s)$.



Фиг. 1 Двумерен обект

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

За двата изхода на обекта може да се запишат уравнения (2) и (3):

$$y_1(s) = G_{11}(s)u_1(s) + G_{12}(s)u_2(s) \quad (2)$$

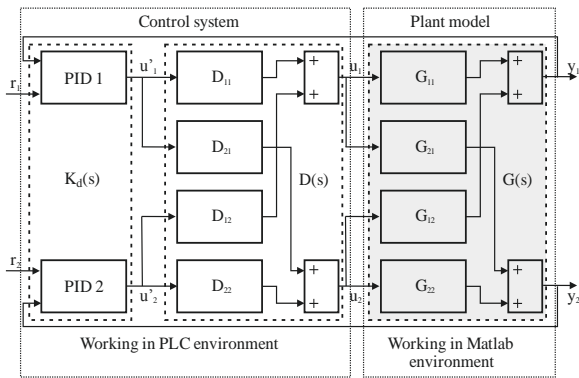
$$y_2(s) = G_{22}(s)u_2(s) + G_{21}(s)u_1(s) \quad (3)$$

Според фиг. 2 управляващите сигнали, подавани на входа на обекта се формират по следния начин (4):

$$u_1(s) = D_{11}(s)u_1^*(s) + D_{12}(s)u_2^*(s) \quad (4)$$

$$u_2(s) = D_{22}(s)u_2^*(s) + D_{21}(s)u_1^*(s)$$

Замествайки (4) в (2) и (3) за управляващите величини се получава (5) и (6):



Фиг. 2 Управление чрез декупиращи филтри

$$\begin{aligned}
 y_1(s) &= G_{11}(s)D_{11}(s)u_1^*(s) + G_{11}(s)D_{12}(s)u_2^*(s) + \\
 &+ G_{12}(s)D_{22}(s)u_2^*(s) + G_{12}(s)D_{21}(s)u_1^*(s) \\
 y_2(s) &= G_{22}(s)D_{22}(s)u_2^*(s) + G_{22}(s)D_{21}(s)u_1^*(s) + \\
 &+ G_{21}(s)D_{11}(s)u_1^*(s) + G_{21}(s)D_{12}(s)u_2^*(s)
 \end{aligned}$$

Сигналът $u_2^*(s)$ трябва да бъде премахнат от (5) и сигналът $u_1^*(s)$ трябва да бъде премахнат от (6). Избирайки (7), уравнения (5) и (6) добиват вида (8) и (9). Съответните сигнали са премахнати успешно, но с цената на промяна в динамиката и необходимост от познаване на точен параметричен модел.

$$\begin{aligned}
 D_{11}(s) &= 1, D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}, \\
 D_{21}(s) &= -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}, D_{22}(s) = 1
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$y_1(s) = G_{11}(s)u_1^*(s) - G_{12}(s)\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}u_1^*(s) \quad (8)$$

$$y_2(s) = G_{22}(s)u_2^*(s) - G_{21}(s)\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}u_2^*(s) \quad (9)$$

Като се отчетат уравнения (7) предавателната матрица на компенсатора има следната форма (10).

$$D(s) = \begin{vmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Наблюдавайки (10) лесно може да се отбележат редица проблеми с прилагането на този подход. Необходимо е познаване на модела на обекта и неговите параметри с голяма точност. Степента на точност определя до колко взаимното влияние ще бъде елиминирано. Много често точен модел на обекта не е известен или неговото намиране не е оправдано от техническа или финансова гледна точка. Делението на предавателни функции може да доведе до нежелани ефекти. При наличие на закъснение в

предавателните функции, ако разликата между закъснението в числителя и знаменателя на (10) е отрицателно число, то резултатното закъснение се изразжда в изпреварване/предсказване. Такъв елемент на декупиращата матрица е некаузална система. Ако

$$nb_{12} + na_{11} > na_{12} + nb_{12} \quad (11)$$

където nb и na са числител и знаменател на съответния елемент от предавателната матрица, то след деление получената предавателна функция отново е физически нерализуема. Твърдението е в сила и за втория елемент на компенсатора с точност до индексите.

Непознаването на модел на обекта може да се атакува с добре известни подходи от идентификацията. За целите на автоматичната настройка е необходимо моделът да⁽⁵⁾ сравнително прост, параметрите му да бъдат намирани лесно, динамиката да не е твърде далеч от тази на реалния обект. Повечето процеси в индустриалните системи⁽⁶⁾ характеризират с монотонно нарастване и самоустановяване. Това оправдава използването на апроксимации от типа на апериодично звено от първи или втори ред с или без наличие на чисто закъснение. За да се избегне проблемът с получаване на некаузални предавателни функции за елементите на декупиращия филтър се избира модел без наличие на закъснение. По подобни причини реда на апроксимацията се фиксира на две. Това гарантира получаване на каузална и правилна предавателна функция. Един такъв модел (12), апериодично звено от втори ред може да опише с добра точност голяма част от индустриалните обекти.

$$W_m(s) = \frac{K_m}{(T_{m1}s + 1)(T_{m2}s + 1)} \quad (12)$$

За намирането на всеки един модел по съответните канали са необходими три параметъра – коефициент на пропорционалност и две времеконстанти. За целта се използва добре познатият експеримент с подаване на стъпално въздействие. От установената стойност на изхода се изчислява коефициента на пропорционалност, а след това записаният преходен процес се използва за намиране на двете времеконстанти. Прилага се методът на най-малките квадрати. Градиентните методи са чувствителни към началните условия. Изборът на начални условия за две времеконстанти е по-лесен и интуитивен от избор на четири коефициента на диференчно уравнение. Поради тази причина се използва апроксимация в непрекъснато време, а не дискретен регресионен модел.

СИМУЛАЦИОННИ РЕЗУЛТАТИ

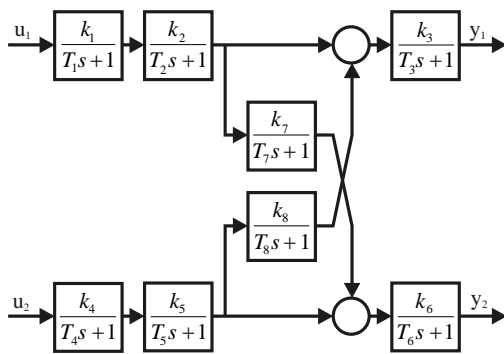
Експериментите са проведени в разработената [3] експериментална хибридна система, при която напълно се симулира работата на реална система за управление състояща се от промишлен контролер (PLC) и SCADA система, които работят в реално време. Обектът за управление е симулиран в среда на MATLAB и също работи в реално време. Комуникацията между системата за управление и симулирания в MATLAB обект се извършва през OPC сървър. В среда на PLC са реализирани ПИД регулаторите, декупиращите филтри и процедурата по самонастройка на регулаторите. Системата работи в реално време, като тактът на дискретизация може да се променя. Всеки от елементите на системата може да работи в ръчен

и автоматичен режим, което дава възможност за провеждане на различни експерименти – напр. работа в отворен контур, изследване на работата на компенсаторите, процедура за самонастройка на регулаторите. В автоматичен режим системата работи в затворен контур, което дава възможност за изследване на качеството на процесите на управление.

SCADA системата осигурява визуализация на процесите в реално време, задаване на параметри и режими на работа, запис на данни от проведените експерименти, комуникация през OPC сървър и др.

Зададен е следният обект за управление, показан на фиг. 3. Параметрите на обекта са:

$$k_1 = 0.7, k_2 = 1.0, k_3 = 1.0, k_4 = 0.6, k_5 = 1.0, k_6 = 1.0, \\ k_7 = 0.47, k_8 = 0.5, T_1 = 7 \text{ s}, T_2 = 3 \text{ s}, T_3 = 1 \text{ s}, T_4 = 5 \text{ s}, \\ T_5 = 1 \text{ s}, T_6 = 1 \text{ s}, T_7 = 1 \text{ s}, T_8 = 10 \text{ s}.$$



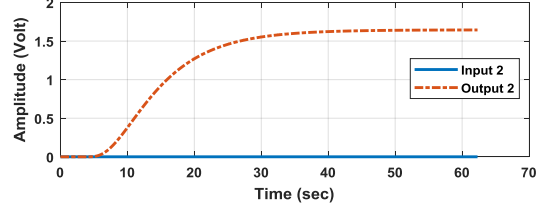
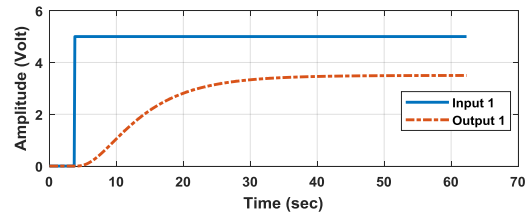
Фиг. 3 Обект за управление

С помощта на операторската станция се извършват два експеримента с обекта за управление. Последователно, като се изчаква установяване на изходните сигнали се подават стъпаловидни входни сигнали на двата входа. Всеки експеримент дава възможност за намиране на две предавателни функции от предавателната матрица на обекта – правия контур и кръстосаната връзка към другия контур. Записаните входно-изходни данни се изпращат през OPC сървъра към средата на MATLAB, където се реализира оптимизационна процедура, базирана на „Най-малки квадрати“. Функцията *lsim()* дава възможност симулиране на линейна система при зададен входен сигнал. Формира се грешка, разликата между реалния изход и този на модела. Търси се максимална близост във времевата област при конкретна структура на модела (12).

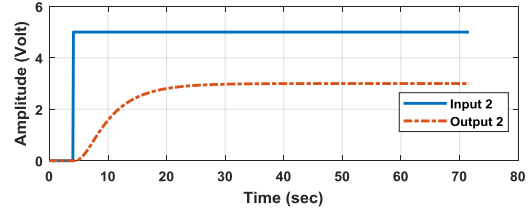
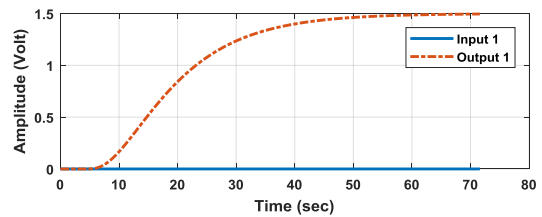
Проведени са два експеримента с обекта с цел набиране на данни за идентификация, по методиката описана по-горе в изложението. Експерименталните данни са показани на фиг. 4 и 5.

След провеждане на идентификацията са получени четири предавателни функции, отговарящи за всеки контур на обекта. Резултатите са показани на фиг. 6, 7, 8 и 9.

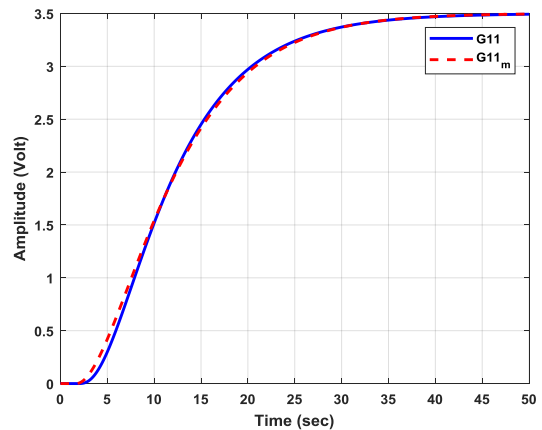
Освен графични резултати е необходима количествена мярка на грешката от немоделирана динамика. Тъй като точният модел на обекта не е известен, а само негов непараметричен модел под формата на преходна функция, което представлява сигнал сам по себе си, може да се използва норма на сигнал.



Фиг. 4 Изходни реакции при сигнал на първи вход



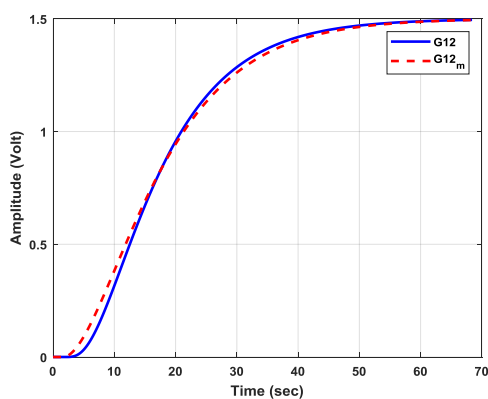
Фиг. 5 Изходни реакции при сигнал на втори вход



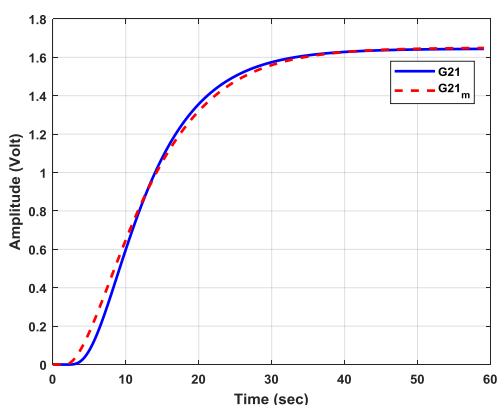
Фиг. 6 Сравнение между реалните и оценените преходни функции

Сигналът на грешката се получава като разлика между реалния изход на системата y и изхода на модела y_m . Нормата на сигнала на грешката се отнася към нормата на реалния изход на системата. Това дава относителна мярка на грешката от апроксимация (13).

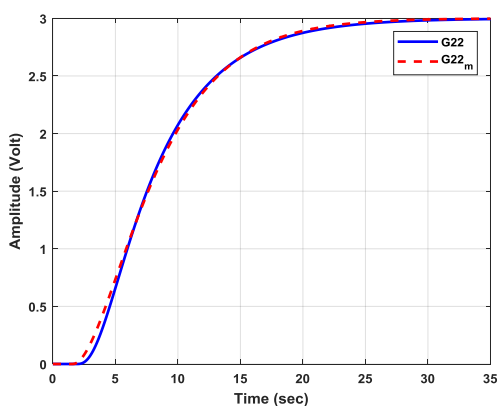
$$J = \frac{\|y - y_m\|_2}{\|y\|_2} \quad (13)$$



Фиг. 7 Сравнение между реалните и оценените преходни функции



Фиг. 8 Сравнение между реалните и оценените преходни функции



Фиг. 9 Сравнение между реалните и оценените преходни функции

В таблица 1 са показани получените параметри за всеки един модел, както и пресметнат критерий (13).

Таблица 1.

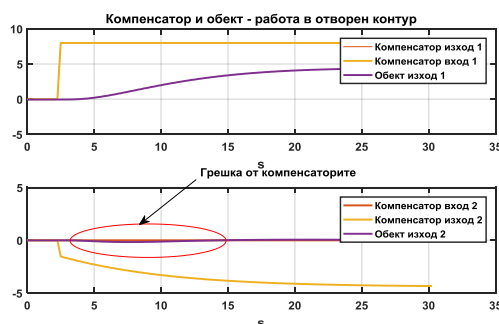
Модел	K_m	T_{m1}	T_{m2}	J
G_{11}	0.7	5.5567	5.5567	0.0116
G_{12}	0.3	8.6153	8.6153	0.0227
G_{21}	0.329	6.1096	6.1096	0.0244
G_{22}	0.6	3.5871	3.5871	0.0088

При известна матрица на компенсатора се преминава към синтез на два едномерни ПИД регулатора с паралелна структура. Използва се вторият метод на Астрьом и Хаглунд [2]. Процедурата по намиране на параметрите на управляващите устройства е автоматична. Допълнително се избира времеконстанта за филтър на диференциалната съставка, десет пъти по-малка. Параметрите са показани в Таблица 2.

Таблица 2.

	K_p	T_i	T_d	T_f
ПИД1	5.177	6.32	1.57	0.157
ПИД2	4.176	4.08	0.52	0.052

Основен критерий за правилната работа на системата е премахване на влиянието между двата контура. На фиг. 10 е показан експеримент, при който в отворен контур на входа u_1 (виж фиг. 2) е подаден входен сигнал 8 V, а на входа u_2 - 0 V. На същата фигура долу се вижда, че съществува грешка от компенсацията на влиянието между двата канала, но тя е минимална. За сравнение в [3] е показан подобен експеримент, при който параметрите на компенсаторите са изчислени при точните параметри на обекта. В този случай компенсацията е пълна.



Фиг. 10. Компенсация на взаимното влияние между каналите

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен е метод за определяне на параметрите на компенсатори за ПИД управление на обекти с два входа и два изхода. За провеждане на експерименти е използвана разработена от авторите хибридна експериментална среда. Получените резултати показват, че този подход може да се прилага при управление на двумерни обекти със самоустановяване.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Smith C., A. Corripio, Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley and sons, Inc, 1997
- 2 Т. Н. К. Astrom, PID Controllers: Theory, Design and Tuning 2nd Edition, 1995.
3. Раков Б., Г. Ружиков, Програмна среда за проектиране на PLC ПИД управление на обект с два входа и два изхода, Годишник на ТУ-София, том 67, книга 2, 2017г. стр. 263-272.

Този доклад е разработен по договор за научен проект в помощ на докторант № 172ПД0015-08