

Настройка на ПИД регулатор

I. Въведение

Настройката на регулатора в една система за автоматично регулиране е важен етап от нейното изграждане, в който параметрите на регулатора се подбират с цел постигане на зададените показатели на качеството на регулиране.

В това упражнение ще бъдат илюстрирани някои от най-известните в практиката методи за настройка на ПИД регулатори. Целта е студентите да бъдат запознати с особеностите на тези методи, с техните предимства и недостатъци, като проиграт на практика последователностите от действия при отделните методи и анализират получените резултати.

II. Теоретични основи

С течение на годините са разработени множество методи за настройка на регулатори. Някои от тях дават много прецизни резултати, но са свързани с тежки изчислителни процедури. Други се базират на прости формули, но пък дават качество на регулиране, което може да варира в известни граници. Въпреки това за инженерната практика познаването на втората група методи е много по-важно. Нека да си представим инженер, отговарящ за настройката на регулаторите в производство, в което има, да речем, стотина управляващи контура. Ако в инструментариума на инженера липсват прости методи за настройка, ще му бъде доста трудно, даже невъзможно, да отделя много време за настройката на всеки един контур.

Най-разпространените методи за настройка на **ПИД** регулатори са тези, разработени от **Ziegler** и **Nichols**. Появата им е в резултат главно от влиянието на практиката в **ПИД** регулирането преди повече от половин век. Тези методи са базирани на характеризирането на динамиката на процесите чрез няколко параметъра и прости уравнения за параметрите на регулатора. Изненадващо е, че методите са толкова широко прилагани, тъй като те дават определено добри резултати само при ограничени ситуации. Приемливо обяснение е тяхната простота и факта, че те могат да се използват при прости упражнения в базовите курсове по автоматично регулиране.

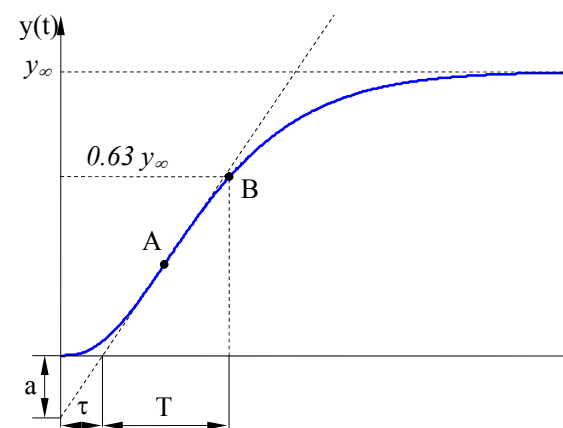
1. Методи, основаващи се на данни от преходната характеристика на обекта.

- Първи метод на Ziegler-Nichols

При този метод преходната характеристика на обекта е оценена само по два параметъра – a и τ , както е показано на фиг.1. Преходната характеристика е получена при единично стъпално въздействие на входа на обекта. Първо се определя точката А, където наклонът на преходната характеристика е най-голям (това е инфлексната точка на кривата). Построява се допирателна към преходната характеристика в т.А. Пресечните точки на допирателната с координатните оси определят параметрите a и τ . Стойностите на параметрите на регулатора са дадени в табл.1.

Табл. 1

Регулатор	K	T _i	T _d
П	$\frac{1}{a}$	-	-
ПИ	$\frac{0.9}{a}$	3τ	-
ПИД	$\frac{1.2}{a}$	2τ	$\frac{\tau}{2}$



Фиг.1

Този метод на **Ziegler-Nichols** е разработен с цел да даде на затворената система добро потискане на смущенията по товар. Методът е базиран на многобройни симулации. Критерият е в рамките на един период на колебанията амплитудата да бъде намалена 4 пъти. Това отговаря на

полюси на затворената система с коефициент на затихване ξ около **0.2**, което е твърде малко. Следователно регулаторите, настроени по този метод, дават затворена система с малка устойчивост. Също така излиза, че е недостатъчно да се характеризира динамиката на обекта само с два параметъра. С течение на годините са предложени подобрени методи, също толкова прости като разгледания дотук първи метод на **Ziegler-Nichols**.

- Метод на Åstrom-Hägglund

Този метод оценява преходната характеристика на обект със саморегулиране по три параметъра k_o , T и τ . На тези параметри съответства модел на обекта с предавателна функция

$$W_o(p) = \frac{k_o}{Tp+1} e^{-p\tau} \quad (1)$$

Определянето на параметрите е в съответствие с фиг.1. Закъснението τ се определя по същия начин както в предишния метод. Времекопектанта T е времето от пресечната точка на допирателната до проекцията на точката **B**, при която преходната характеристика достига до 63% от установената си стойност y_∞ . Коефициентът k_o е статичният коефициент на системата и при единично входно въздействие и нулева начална стойност на изходната величина е равен на установената стойност. Параметърът τ се нарича видимо закъснение, а T - видима времекопектанта, за да се подчертае, че те са получени в следствие на апроксимация. При разработването на метода са използвани понятията **функция на чувствителност**, която представлява следната предавателна функция

$$S(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)W_o(p)}$$

и максимална чувствителност

$$M_s = \max_{\omega} |S(j\omega)| = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + W_p(j\omega)W_o(j\omega)} \right|.$$

Максималната чувствителност е важен параметър който дава най-голямото усиление на смущенията върху системата за честотния спектър, при който тя работи. Целта при настройката е да се постигне възможно най-голямо потискане на нискочестотните смущения чрез максимизиране на коефициента пред интегралната съставка на регулатора K/T_i при ограничение на максималната чувствителност $M_s < 1.4$. За **ПИ** регулатор правилата за настройка са следните:

$$K = \begin{cases} 0.3 \frac{T}{k_o \tau} & \text{за } \tau/T < 2 \\ 0.15 k_o & \text{за } \tau/T > 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_i = \begin{cases} 8\tau & \text{за } \tau/T < 0.1 \\ 0.8T & \text{за } 0.1 < \tau/T < 2 \\ 0.4\tau & \text{за } \tau/T > 2 \end{cases}$$

- Модифициран метод на Rivera, Morari и Skogestad (SIMC)

Методът е приложим както за модели от вида (1), така и за модели от втори ред със закъснение с предавателна функция

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-p\tau} \quad (3)$$

където $T_1 > T_2$. Използването на диференциална съставка се препоръчва само за модели от втори ред. Критерият за настройка е минимално време на регулиране и максимална чувствителност $M_s < 1.7$. Формулите за настройка са следните:

$$K = 0.5 \frac{0.5T_1}{k_o \tau}$$

$$T_i = \min\{T_1, 8\tau\} \quad (4)$$

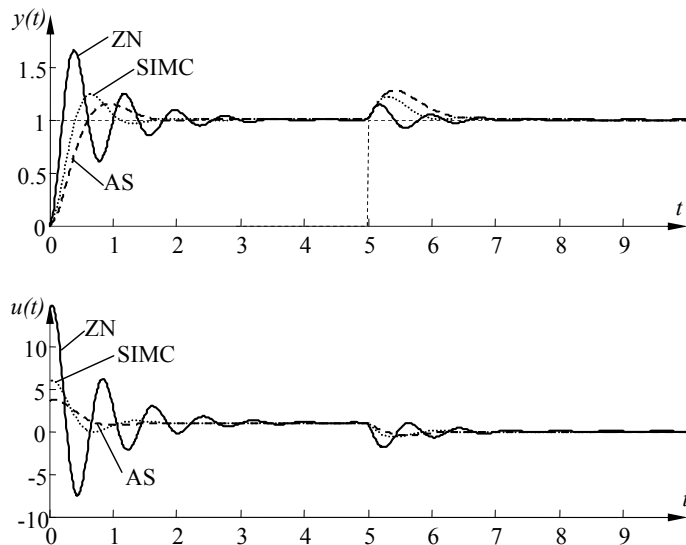
$$T_d = T_2 \quad (\text{за } T_2 > 0)$$

Сравнителни симулации между методите на **Ziegler-Nichols (ZN)**, **Åstrom-Hägglund (AS)** **Rivera, Morari и Skogestad (SIMC)** и са дадени на фиг.2 ÷ фиг.4 за обекти с предавателни функции

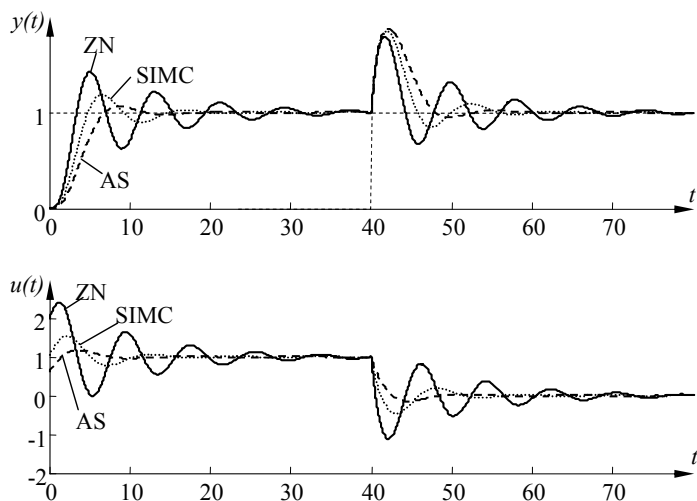
$$W_{o1}(p) = \frac{1}{(p+1)(0.2p+1)}; W_{o2}(p) = \frac{1}{(p+1)^4}; W_{o3}(p) = \frac{1}{(0.05p+1)^2} e^{-1.2p}$$

Тези предавателни функции са характерни за широк диапазон от обекти в практиката. Ако се апроксимират предавателните функции към модел от вида (1), се вижда, че първият процес има динамика, доминирана от времекопектанта на модела, третият – от закъснението, а вторият има балансирана динамика. Прекъснатите криви показват преходните процеси на **ПИ** регулатор, настроен по метода на **Åstrom-Hägglund**, прекъснатите с по-ситни черти - по метода на **Rivera, Morari и Skogestad**, а плътните - по първия метод на **Ziegler-Nichols**. Симулациите са за преходни процеси по

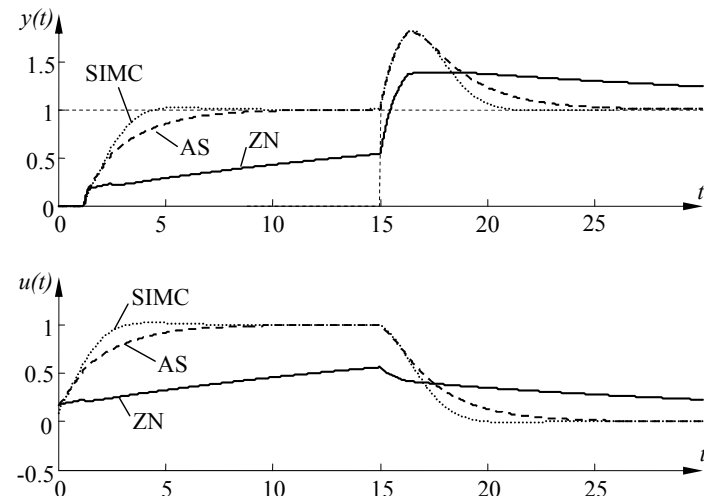
задание в момента 0 и на смущение по товар. Показани са графиките на регулируемата величина $y(t)$ и управляващото въздействие $u(t)$.



Фиг.2 Симулация на преходните характеристики по задание и смущение за обект с предавателна функция W_{01}



Фиг.3 Симулация на преходните характеристики по задание и смущение за обект с предавателна функция W_{02}



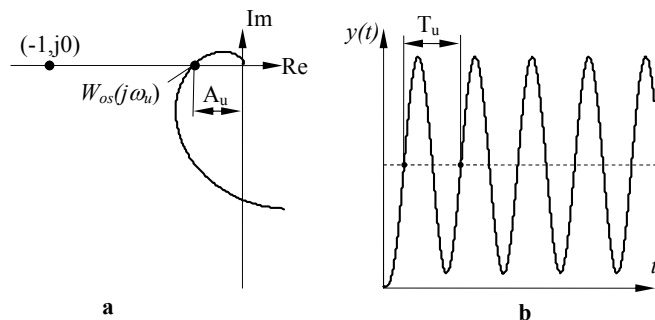
Фиг.4 Симулация на преходните характеристики по задание и смущение за обект с предавателна функция W_{03}

Фиг.2 и фиг.3 показват високата колебателност на процесите и големите стойности на управляващото въздействие при настройка по метода на **Ziegler-Nichols**. Това е и цената за по-слабата реакция на смущенията по товар. От фиг.4 се вижда лошото представяне на системата, настроена по метода на **Ziegler-Nichols** при обекти с доминиращо закъснение. От трите фигури може да се направи заключение, че регулаторите, настроени по **SIMC** метода, дават най-бързи преходни процеси, докато тези, настроени по метода на **Ästroom-Hägglund**, дават преходни процеси без забележими колебания и с най-малки стойности на управляващото въздействие. Това спомага и за избягване на ефекта “Windup”.

2. Метод на критичните параметри (втори метод на Ziegler-Nichols).

Методът се базира на привеждането на затворената система на границата на устойчивост, в следствие на което се предизвикват незатихващи колебания на изхода на системата. Параметрите на регулатора се изчисляват, като се определи критичният коефициент на регулатора K_u , при който се получават незатихващите колебания и периода на колебанията T_u . Критичните показатели могат да бъдат получени по два начина. При възможност за получаване на **АФЧХ** на отворената система при коефициент на регулатора $K = 1$ и $T_i = \infty$, $T_d = 0$ се определя модулът A_u и честотата ω_u , при които **АФЧХ** пресича за първи път отрицателната реална ос. Както е известно, реципрочната стойност на A_u дава критичният

коэффициент на отворената система и търсеният $K_u = (A_u)^{-1}$. Периодът на колебанията е $T_u = 2\pi/\omega_u$. Ако в затворената система се допускат незатихващи колебания, критичните параметри могат да се получат и чрез преходните процеси на затворената система. Тогава се свързва системата при параметри на регулатора $K = 1$, $T_i = \infty$, $T_d = 0$ и се увеличава коефициентът на регулатора докато се получат незатихващи колебания. Периодът на колебанията се отчита от графиката на преходните процеси. Двата подхода са показани на фиг.5, а формулите за настройка на регулатора са дадени в табл.2.



Фиг. 5 Определяне на критичните параметри по: а) АФЧХ на отворената система за $K = 1$, $T_i = \infty$, $T_d = 0$ и б) преходната характеристиката затворената система при $K = K_u$, $T_i = \infty$, $T_d = 0$

Табл. 2

Регулатор	K	T_i	T_d
П	$0.5K_u$	-	-
ПИ	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
ПИД	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

Удобството при втория метод на **Ziegler-Nichols** е, че не е необходимо получаване на модел на обекта за настройката на регулатора. За сметка на това трябва да имаме данни за АФЧХ на обекта или да можем чрез експеримент да предизвикаме незатихващи колебания в затворената система. Освен това за обекти от първи или втори ред с П регулатор не могат да се постигнат незатихващи колебания, така че за тях не може да се приложи тази настройка. Методът осигурява приблизително 35-40% пререгулиране и често се използва от производителите на регулатори като указание за настройка при първоначално пускане на системата.

Разработени са варианти на формулите на **Ziegler-Nichols** за настройка на **ПИД** регулатори, които осигуряват процеси с около 20% пререгулиране и процеси без пререгулиране (табл.3).

Табл. 3

Регулатор	K	T_i	T_d
Ziegler-Nichols	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$
20% пререгулиране	$0.33K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$
Без пререгулиране	$0.2K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

От гледна точка на автоматизацията този метод е доста неудобен, тъй като затворената система трябва да бъде доведена до границата на устойчивост. Освен това за определянето на граничния коефициент на регулатора се предполага активна работа от страна на оператора. **Åström** и **Hägglund** предлагат решение, при което критичните параметри могат да бъдат получени чрез предизвикване на незатихващи колебания в системата посредством двупозиционен алгоритъм. Методът е един от основните при регулаторите с автоматична настройка на параметрите.

Двупозиционният регулатор е със нулева зона на хистерезис, а заданието в нормирани единици трябва да е около **0.5**, за да се получат симетрични управляващи импулси. Условието за прилагането на този метод е обектът да е от трети или по-висок ред. Основната идея е, че импулсите получени от двупозиционния регулатор могат да бъдат апроксимирани със синусоиден сигнал. При нулева зона на хистерезис входният сигнал на обекта (управляващите импулси от регулатора) и регулируемата величина са в противофаза ($\Delta\phi = -\pi$). От теорията на **Nyquist** се знае, че при това условие системата се намира на границата на устойчивост. Тогава може да се каже, че отношението между амплитудите на входния и изходния сигнал на обекта е критичната стойност на АЧХ на обекта – A_u , а периодът на автоколебанията е всъщност периодът на критичните колебания T_u . При апроксимацията на правоъгълните импулси към синусоиден сигнал чрез използване на формулите на Фурие може да се получи амплитудата на първия хармоник на този сигнал:

$$A_r = \frac{4}{\pi}d,$$

където d е амплитудата на управляващия сигнал.

Така критичната стойност на АЧХ на обекта ще бъде

$$A_u = \frac{a}{A_r} = \frac{a}{4d/\pi},$$

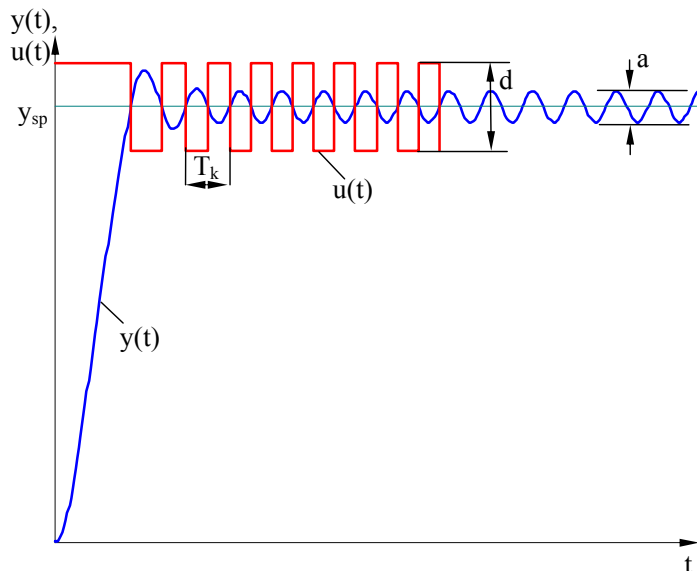
където a е амплитудата на колебанията на регулируемата величина.

Тогава критичният коефициент на ПИД регулатора ще бъде

$$K_u = (A_u)^{-1} = \frac{4d}{\pi a}$$

След определяне на периода автоколебанията T_k могат да бъдат използвани формулите за настройка по втория метод на **Ziegler-Nichols**.

На фиг.6 са показани процесите получени при използването на този метод. Графиката на управляващия сигнал $u(t)$ е изместена нагоре, за да се покаже по-ясно дефазирането на двата сигнала.

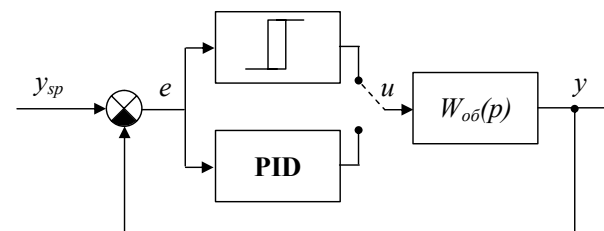


Фиг. 6 Определяне на критичните параметри чрез двупозиционен регулатор с нулев хистерезис

Разбира се, трябва да се има предвид, че вследствие на апроксимацията на правоъгълните импулси получените по този метод критични параметри не са точни. Точността ще бъде по-голяма, ако обектът е от по-висок ред. Освен това липсата на хистерезис на двупозиционния регулатор на практика свежда до нула шумоустойчивостта на системата. Тъй като методът е с фундаментално значение, непрекъснато се разработват негови подобрения – например използване на реле с хистерезис, итеративна процедура при изчислението на критичните параметри, добавяне на филтри на входа на обекта и др.

III. Описание на лабораторния стенд

Примерна схема на лабораторния стенд е показана на фиг.7



Фиг.7 Принципна схема на лабораторния стенд

За предпочитане е обектът да представлява физически модел на технологичен обект, реализиран с операционни усилватели. Целта е да могат лесно да се променят параметрите на обекта. Също така е препоръчително обектът да е от висок ред, например като бъдат свързани последователно поне 5-6 аperiодични звена.

IV. Задание за работа

Подготовка:

За постигане на по-голям ефект от упражнението е необходима предварителна подготовка по следните въпроси:

- апроксимация на технологични обекти;
- честотни методи за анализ на системите за автоматично регулиране;
- двупозиционно регулиране;
- ПИД регулиране.

За методите за настройка по данни от преходната характеристика на обекта се използват модели, получени от упражнението по апроксимация на технологични обекти. Всеки от студентите получава индивидуално задание и извършва сам следните експерименти:

1. Настройка на ПИД регулатор по един от трите метода от т.1 на теоретичната част.
2. Настройка на ПИД регулатор по втория метод на **Ziegler-Nichols** чрез определяне на критичните параметри посредством: постепенно увеличаване на коефициента на ПИД регулатора; използване на двупозиционен регулатор.
3. Снемане на преходните процеси за трите настроени регулатори.
4. Сравнителен анализ на качеството на регулиране за отделните случаи.