

# КОЛИЧЕСТВЕНА ТЕОРИЯ НА ОБРАТНАТА ВРЪЗКА – ПРИЛОЖЕНИЕ И ВЪЗМОЖНОСТИ В ОБЛАСТТА НА РОБАСТНОТО УПРАВЛЕНИЕ

Гл.ас. д-р Весела Карлова-Сергиева

## QUANTITY THEORY FEEDBACK - APPLICATION AND OPPORTUNITIES IN THE FIELD OF MANAGEMENT ROBUST

Vesela Karlova Sergieva

**Резюме:** Автоматизацията като инженерна дейност предполага избор на работни методи. За да се обхване процесът на управление на автоматизираното производство, не може да се разчита единствено на рутината на специалистите. Необходима е теория, която позволява да се проектира системата за управление на производствен процес с отчитане на фактори, които характеризират този процес. Прилагането на количествената теория на обратната връзка, води до изясняване на проблематика, свързана с компромиси, които са наложени от реалните работни условия и произтичащи от фундаменталните понятия – устойчивост, качество, промяна в параметрите на обекта, ниво на смущение, сложност на регулатор и честотна лента.

**Ключови думи:** количествена теория на обратната връзка, робастно управление, система за управление на производствен процес

**Abstract:** Automation as engineering suggesting choice of working methods. To capture management process automated production, can not rely solely on routine of specialists. What is needed is a theory that allows you to design a system to manage the production process, taking into account factors that characterize this process. The application of quantitative theory of feedback leads to clarify the issues of compromises imposed by the actual working conditions stemming from fundamental concepts - sustainability, quality, change the parameters of the object, interference level, complexity of regulator and bandwidth.

**Keywords:** quantitative theory of feedback, Robust control, management system manufacturing process

### I. ВЪВЕДЕНИЕ

Количествената теория на обратната връзка (КТОВ) има доказателства в способността си да синтезира практически системи за управление, като се прави опит да се изгладят различията между теоретичните и инженерните методи, за да се гарантира качество, в този смисъл и робастност на системите за управление. Методът съчетава концепцията за синтез на робастни системи за управление, така че да се поддържа желано качество, не само за определения диапазон на неопределеност в параметрите на обекта, но и също така при неефективно управление в някаква степен. Добрите резултати, които методът дава се дължат на прозрачността на метод КТОВ, т.е. способността да се визуализират връзките при внедряването на управляващи устройства, участващи в синтеза от реалните работни условия, от началото на синтеза през индивидуалните стъпки на този синтез [1-6].

### II. ЦЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕТО

*Основно проблемите при управлението могат да се разделят в следните позиции:*

**2.1** Набор от показатели на качество, които трябва да бъдат постигнати.

**2.2** Набор от диференциални уравнения, които описват физическата система или идентификация за получаване на модел на обекта или процеса.

**2.3** Синтез на управление с помощта на компютър или специализиран софтуер, който включва:

а) анализ на качество на базовата некомпенсирана система чрез налични методи за анализ или комбинация от тях;

б) ако качеството не отговаря на желаното, се избира метод за синтез, който ще го подобри;

в) за обекти, които притежават структурирана неопределеност, може да се приложи КТОВ.

Параметричната неопределеност се получава, когато параметрите на обекта се променят по време на експлоатацията му.

**2.4** Симулация на синтезираната нелинейна система.

**2.5** Внедряване и тестване на реалната система.

Синтезът на система за получаване на желано качество е целта на управлението. Необходими са основни знания и тогава системата ще изпълнява желаните функции за управление.

Въпреки че повечето системи са нелинейни, в много случаи нелинейността, която участва в описанието е много малка и може да бъде пренебрегната или физичните ограничения са малки и позволяват да се използва линейния анализ.

### **III. ПРОЕКТИРАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С ГАРАНТИРАНО КАЧЕСТВО**

Тестовите на проектираната система се правят при допускания, че се използват линейни модели, при симулациите може да се отчита нелинейност или не, внедрява се хардуер, могат да се появяват немоделирани ефекти и поведение. Повечето от проблемите при внедряване са в резултат от подобни допускания по време на фазата на синтез. При използването на подходи за управление, които изискват линейни модели, е необходимо допускане, което ще позволи опростяване на тези нелинейни обекти, т.е. допуска се линейно поведение, така че да се получи линеен модел на обекта. Ето защо, от съществена важност е проектантът да следва синтеза и процеса при внедряване, така че да се позволи тест на допусканията в ранната фаза на процеса на синтез, за да е възможно да се направи навреме пренастройка и да се избегнат ефекти като немоделирана динамика. Основните аспекти на проектирането на система за управление с гарантирано качество са илюстрирани на фиг.1. Отделните елементи от тази фигура помагат за изясняване на различията между теорията и практиката. Ако системата за управление не притежава желано качество във всяка една фаза от проектирането, се налага пренастройка. Трябва да се има предвид, че ако съответните симулации станат твърде реалистични, това ще струва много време и финансови средства, затова е много важно да се локализира проблема навреме. Овалите, разположени вътре във фигурата, показват някои от свойствата на метода КТОВ, които помагат на проектанта да постигне желаните цели на синтеза.

#### **3.1 Функционални изисквания**

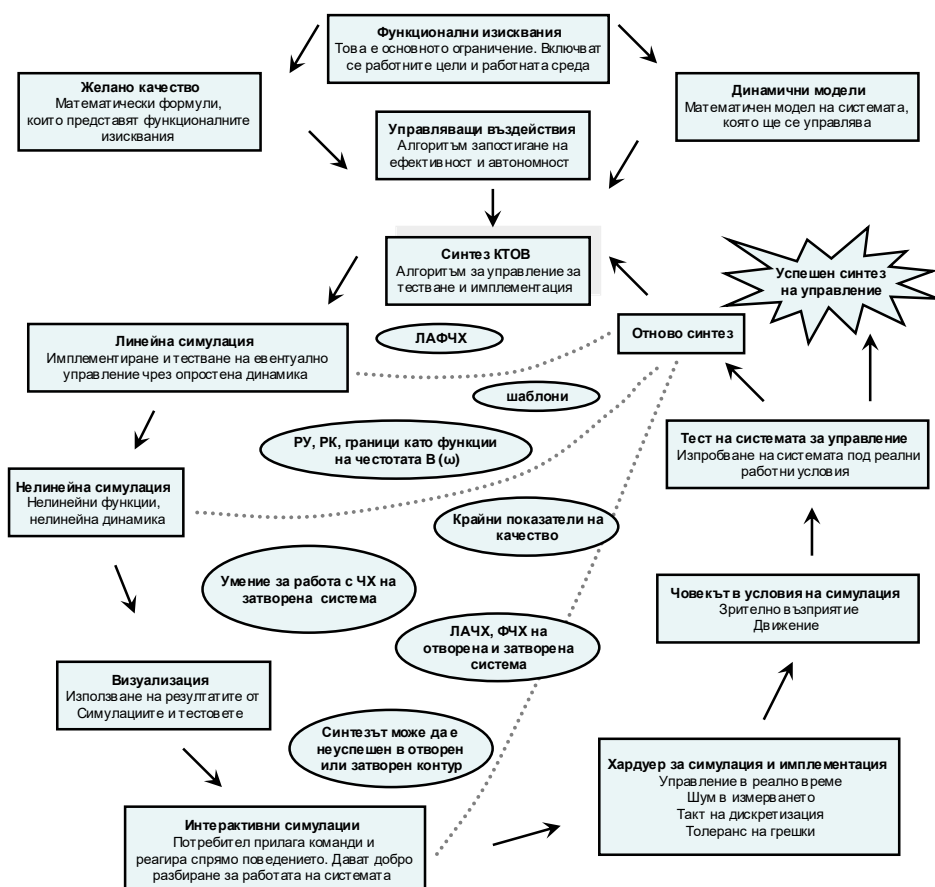
Преди да започне процеса на синтез проектантът трябва да бъде наясно кои проблеми трябва да бъдат разрешени и какви са работните изисквания, работната среда. Това е необходимост, за да не се губи време за цикъл пренастройка.

#### **3.2 Желано качество**

Желаното качество се формира чрез математични модели, съобразно функционалните изисквания към системата, така че тези модели, използвани при проектирането, да гарантират робастност на системата. Проектантът трябва да умее и да притежава инженерен усет да разбира как са свързани функционалните изисквания с желаното качество.

#### **3.3 Динамичен модел**

Динамичният модел представлява математичен модел на управляваната система, получен вследствие на знание за системата и функционалното ѝ предназначение. Моделът може да бъде линеен, описан с предавателна функция или да представлява набор от сложни нелинейни диференциални уравнения с променливи параметри. В много случаи се предпочита опростен модел на динамичната система. Проектантът трябва да опита да използва прости модели като възможност да представи динамиката на системата. По този начин е възможна редуция на модела, не само от тази гледна точка, а и от гледна точка на намаляване на числени неточности, като се отбелязва, че прекалено опростеният модел може да доведе до заблуди.



Фиг. 1

### 3.4 Управляващи въздействия

Важна част от проектирането е в определянето на управляващите (регулиращите) въздействия. Трябва да се внимава да не се допусне излишък на регулиращи въздействия, т.е. да не се получи те да са повече от управляваните (регулируемите) величини, както и да не се получи ненужна свързаност, което да затрудни управлението на действителната величина.

### 3.5 Синтез по метод количествена теория на обратната връзка

Получаване на математически алгоритми, които могат да се внедрят в управлението, за да се получи и гарантира желано качество на реалната система.

### 3.6 Линейна симулация

КТОВ синтезът включва линеаризирани нелинейни уравнения, затова системата за управление трябва да бъде симулирана с всеки един от възможните обекти и да се

проверят резултатите. Ако някои от показателите на качество не са получени, се налага пренастройка. Проектантът трябва да осигури достатъчно близко качество за всички функционални изисквания.

### **3.7 Нелинейна симулация**

Веднъж системата преминала през фазата на линейната симулация, сложността при симулиране се увеличава, като се добави нелинеен компонент, който е бил изключен на фаза линейна симулация. Може да се наложи пренастройка във всяка една от стъпките на синтеза.

### **3.8 Визуализация**

Всяка една от симулациите се визуализира на компютър, тъй като по този начин по-добре се разбира точно какво става в динамично отношение.

### **3.9 Интерактивна симулация**

Обикновено човек-оператор участва в управлението на системата. Реализира режими на ръчно управление, за да се разбере по-добре цялата работа на системата и/или до подаде на проектанта допълнителна информация или се симулира точното поведение на системата при внедряване.

### **3.10 Хардуер за симулация и внедряване**

В тази фаза на проектиране получените алгоритми за управление са имплементирани в хардуер, който управлява динамичната система. Други хардуерни елементи като регулиращи органи, датчици също се свързват към системата. В тази фаза се извършва симулация в реално време, определя се такт на дискретизация и т.н. Анализира се поведението на системата в затворен контур.

### **3.11 Човек в условия на симулация**

Анализира се зрителното възприятие на човека – оператор, движението му при управление на системата.

### **3.12 Тест на системата**

Представява тест на системата в реални работни условия. Проектирането на системата е успешно, ако в работната среда се получи желаното качество на регулируемите величини.

### **3.13 Пренастройка**

Във всяка фаза от проектирането на системата и процеса на внедряване, проектантът взима решение да продължи в следваща фаза или да се наложи пренастройка или модификация.

## **IV. ОБЛАСТИ НА ПРИЛОЖЕНИЕ НА КОЛИЧЕСТВЕНАТА ТЕОРИЯ НА ОБРАТНАТА ВРЪЗКА**

КТОВ е метод, който придава особено значение на обратната връзка за получаване на желан толеранс на качество в условия на неопределеност и смущения върху обекта на управление. КТОВ количествено използва входно-изходните връзки по задание и входно-изходните връзки по смущение, набор от обекти, получени вследствие на неопределеност. КТОВ е развит за линейни и нелинейни системи, непрекъснати и дискретни, неопределени с един вход и един изход, неопределени с много входове и много изходи. Също методът може да се разшири и към клас обекти с неопределени, разпределени параметри. Реалните

физически системи се описват с набор от математични уравнения, а след това анализът не зависи от природата на физическата система, дали тя е електрическа, механична и т.н. Методът помага на проектанта да открие сходство, базирано на предишен опит.

**4.1** Една от основните предпоставки за прилагане на метода е наличието на неопределеност в параметрите на обекта. КТОВ работи директно с всяка неопределеност и не се налага предварително частно представяне.

**4.2** Много системи имат сложна динамика и са много трудни за получаване на аналитичен модел. В такъв случай се провеждат експерименти, при които се снима реална честотна характеристика. Методът работи с целия набор честотни характеристики при неопределеност, без да изисква идентификация на обекта.

**4.3** За разлика от линеаризацията при малка промяна в работната точка, идеята при КТОВ е да се замени нелинейния обект с  $n$ -брой линейни обекти, използвайки допустими входно-изходни характеристики. Нелинейният обект се представя като набор от линейни обекти, които покриват диапазона на структурираната параметрична неопределеност.

**4.4** При синтезът на системи за управление съществува проблем при удовлетворяване на желано качество чрез няколко показателя и/или поддържането им при неопределеност, тоест в аспект робастно качество. КТОВ създава граници, които гарантират изпълнението на всяко ограничение. Още повече, че в реалната ситуация, ограниченията са в даден диапазон, зависещ от спецификата на процеса, а методът не изисква изпълнението на приведен в честотната област критерий за всяка честота от нула до безкрайност.

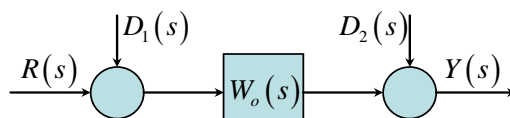
**4.5** Необходимо е да има априорна информация за целия набор от всички известни смущения външни или вътрешни и тяхното влияние върху връзката между входа и изхода. На база тази информация се определя желан толеранс на изхода, за да се поддържа разумен нисък коефициент на усилване.

По този начин се избягват проблеми, свързани с усилване на високочестотния шум, насищания и високочестотна неопределеност. Именно поради горните причини КТОВ използва за получаване на робастност номиналния обект, а не функциите на чувствителност. Ползата от метода, е че в резултат на робастния синтез се получава нечувствителност към структурирана параметрична неопределеност, като за целта се прилага само един подход за пълния диапазон на работа на реалната система за управление. За съжаление, много алгоритми за робастни управления не са приложими в реалната работна среда. Това е така, тъй като реалният проблем е много сложен и в резултат полученият регулатор не може да бъде реализиран със техническите средства.

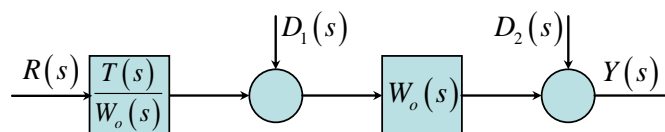
В този случай, регулаторът е с много висок ред или коефициентът му на усилване е много голям и не е възможно да се приспособи към реалната нелинейност, а също така и шумът в измерването силно влияе при големи коефициенти. Подход за избягване на гореспоменатите проблеми е прилагането на метод КТОВ. Въпреки че процедурата по синтез позволява лесно да се проектира регулатор от висок ред и с висок коефициент, т.е. този метод също не е ограничен откъм реално приложение, предимството тук е, че при решение от проектанта за ограничаване на ред и намаляване на коефициента, компромисът в качеството се вижда на момента, а не в по-късен, краен етап. В обобщение КТОВ позволява да се получи робастност като краен резултат чрез опростена процедура по синтез, но регулаторът ще е такъв, че при реализиране в реалната система ще осигури гарантирано качество, за да се избегнат насищания и шум.

## V. ЗАЩО Е НЕОБХОДИМА ОБРАТНА ВРЪЗКА?

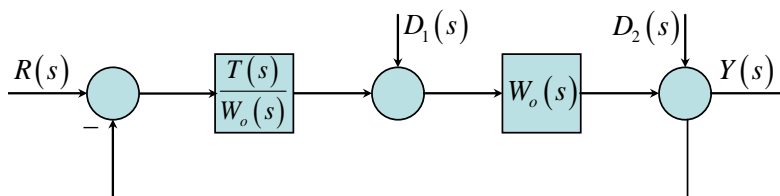
На фиг.2 е показан модел на обект или процес  $W_o(s)$ , с вход  $R(s)$  и изход  $Y(s)$ , при наличие на входно и изходно смущение  $D_1(s)$  и  $D_2(s)$ . Ако е необходимо да се получи предавателна функция на показаната система, тя има вида  $T(s)=Y(s)/R(s)$ . Това се постига с префилтър, чиято предавателна функция е  $F(s)=T(s)/W_o(s)$ , фиг.3.



Фиг. 2



Фиг.3



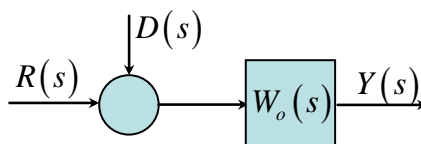
Фиг.4

Компенсиранията система по този начин ще осигури желан изход, докато в системата отсъстват неопределеност и смущения. Този тип проектирана система е чувствителна към промяна в обекта (или съществува неопределеност) и смущенията ще влияят директно на изхода. Ето затова е необходима обратна връзка от изхода, за да се намали изходната чувствителност към промяна в параметрите на обекта на управление и за да се намали влиянието на смущенията на изхода на обекта, фиг. 4. Затворената система за управление трябва да е проектирана за всички познати промени в обекта на управление, да гарантира желан изход в допустими граници, да поддържа разумен нисък коефициент на усилване.

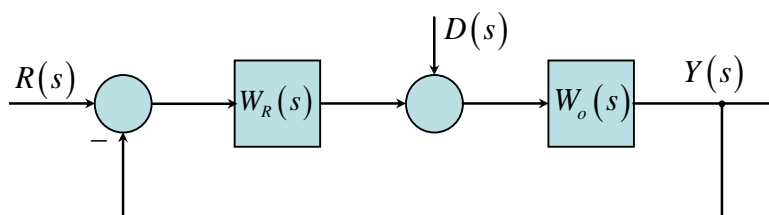
Последното е от съществена важност за да се избегнат насищания, високо честотна неопределеност и шумонезащитеност. Друг пример относно отговора на въпроса: Защо е необходима обратната връзка?, е системата от фиг.5. В нея обектът на управление притежава неопределеност, която представя промяна в неговите параметри множеството  $P$ . Тази система има два входа  $r(t)$ , заданието, което трябва да се следва и външни смущения  $d(t)$ , които трябва да имат минимален ефект върху  $y(t)$ . Записват се следните формули

$$(1) W_o^*(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = T_D(s) \quad (2) W_o^*(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = T_R(s),$$

където  $W_o^*(s)$  е предавателната функция на номиналния обект, а регулаторът е пропорционален с коефициент 1.



Фиг. 4



Фиг.5

Функциите на чувствителност на некомпенсираната отворена система са еднакви

$$(3) S_{W_o^*(s)}^{Y_R(s)}(s) = S_{W_o^*(s)}^{Y_D(s)}(s) = 1.$$

За затворената система се записват съотношенията

$$(4) T_R = \frac{W_R W_o^*}{1 + W_R W_o^*} = \frac{L^*}{1 + L^*} \quad (5) T_D = \frac{W_o^*}{1 + W_R W_o^*} = \frac{W_o^*}{1 + L^*},$$

където  $L^*$  е предавателната функция на номиналната отворена система.

За функциите на чувствителност на затворената система е в сила

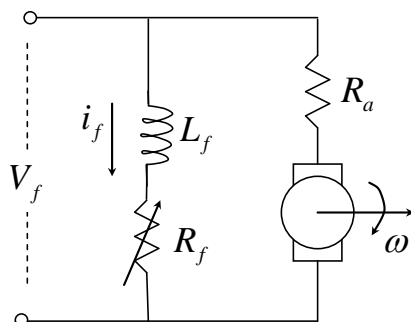
$$(6) S_{W_o^*(s)}^{Y_R(s)}(s) = S_{W_o^*(s)}^{Y_D(s)}(s) = \frac{1}{1 + L^*}.$$

Сравняването на чувствителностите на отворената и затворената система показва, че ефектът от промяната в параметрите на обекта, в множеството  $P(s)$ , върху изхода за затворената система се редуцира от израза  $1 + L^*$ , спрямо чувствителността на отворената система. Това е причина за използването на обратната връзка.

### 5.1 Базов пример за структурирана неопределеност

Разглежда се лабораторен експеримент - включване на постоянно токов двигател. Студентите влизат в лабораторията в студен февруарски ден, за да започнат с експеримента. През почивните дни парното е изключено и температурата в стаята е паднала до  $15^\circ\text{C}$ ; при влизане студент пуска парното за температура в лабораторията  $25^\circ\text{C}$ . Студентите бързо включват двигателя и настройват реостата  $R_f$  за скорост  $\omega = 1200 \text{ r.p.m.}$  Докато изпълнят тази част на упражнението те взимат 1 час почивка, за да може температурата в стаята да достигне  $25^\circ\text{C}$ .

Когато те се връщат, скоростта на двигателя е  $\omega = 1250 \text{ r.p.m.}$  без да се е променило напрежението или реостата  $R_f$ . Защо има промяна в скоростта?



Фиг.6

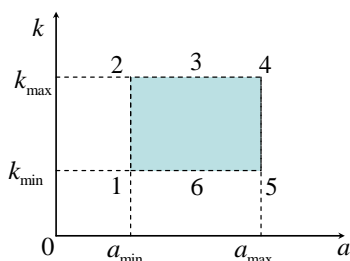
Очакваното затопляне на ДПТ от тока  $i_f$  и околната среда води до нарастване на  $R_f$ . Това поред намалява стойността на  $i_f$  и резултатът е в увеличаване на скоростта, тъй като скоростта е обратно пропорционална на  $i_f$ , допуска се, че  $V_f$  е постоянно. Следователно през времето на работа на ДПТ, параметъра  $R_f$  може да се променя в диапазона  $R_{f\min} \leq R_f \leq R_{f\max}$ , тъй като температурата на околната среда се променя, а и тока  $i_f$  също. Като следствие – налице е неопределеност, която се дължи на мигновена промяна на съпротивлението  $R_f$ . Така че параметричната неопределеност е структурирана, защото диапазона на промяна  $R_f$  е известен и неговото влияние върху връзката между  $V_f$  и ъглова скорост  $\omega$  може да се моделира.

Предавателната функция на ДПТ, използван за управление на позиция има вида

$$(7) W_o(s) = \frac{\Theta_m(s)}{V_f(s)} = \frac{k}{s(s+a)},$$

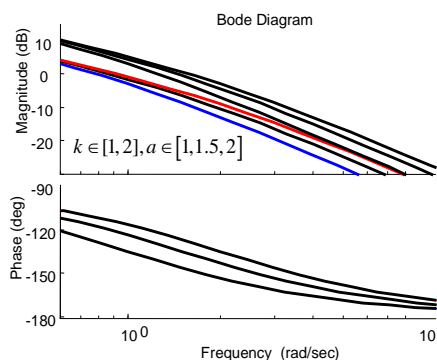
където  $k$  и  $a$  се променят в работни условия в следния диапазон  $k \in (k_{\min}, k_{\max})$  и  $a \in (a_{\min}, a_{\max})$ .

На фиг.6 е показан диапазона на структурираната параметрична неопределеност. ДПТ се представя чрез набор от предавателни функции  $W_{oi}(i=1,2,\dots,J)$ , които са показани на фигурата. На следващата фиг.8 са показани честотните характеристики на набора от шест линейни обекта.



Фиг.7



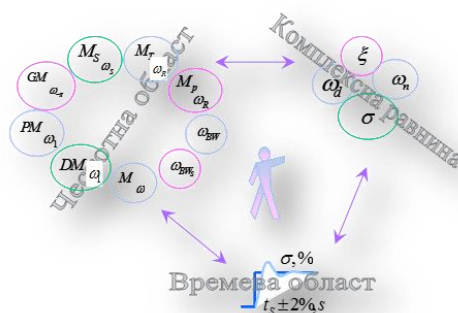


Фиг.8

## VI. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КАЧЕСТВО В СИСТЕМИТЕ ЧРЕЗ ЖЕЛАНИ ГРАНИЦИ

Под понятието качество на управление на система за автоматично управление се разбира набор от характеристики, които категоризират системата. Най-общо подобни характеристики включват точност, устойчивост и бързодействие. Задаването на толеранс оформя правила, наречени критерии за качество, които ако системата ги изпълни, то тя притежава желано качество.

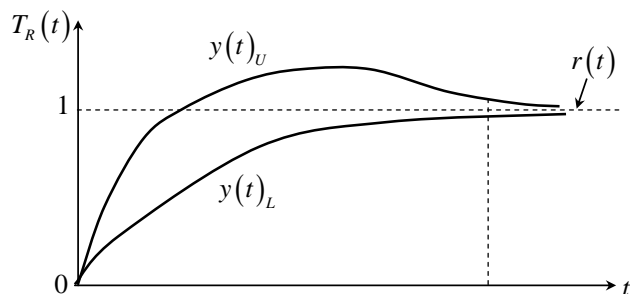
В реални работни условия и при наличието на физични ограничения, произтичащи например от конкретни технически средства, реална непренебрежима нелинейност, параметрите на система за автоматично управление обикновено са променливи. При такова допускане може да се даде следваща категория на понятието качество, а именно робастно качество. Това означава запазване на качество при промяна на работната точка или тази промяна да е породена с течението на времето. Групирането на подходи за постигане на желано качество чрез използване на количествената теория на обратната връзка позволява един многостранен поглед върху цялостната система и е гаранция за удовлетворяване на сложен критерий и потвърждение на резултатите във времевата област. От съществена важност при формирането на правилно управление е разбирането и използването на някои графични и аналитични връзки между показатели на качество в области, в които става избор, анализ и синтез на параметри, определящи и гарантиращи качество на управление [2,5]. Настройката на регулатори не е тривиална задача. Проектантът трябва да съобрази, подбере и да вземе решение на различни нива, които съпътстват постигането и гарантирането на качество на управление, фиг.9.



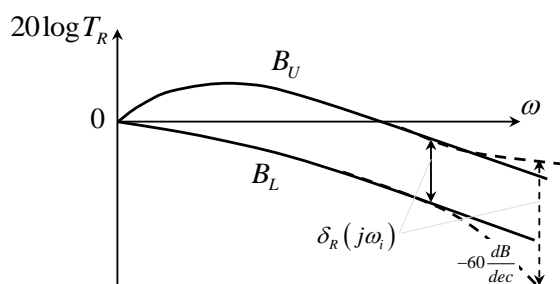
Фиг.9

В много системи за управление изхода  $y(t)$  трябва да бъде разположен в желани граници  $y(t)_U$  и  $y(t)_L$ , съответно горна и долна. Основните показатели на времевата област са представени на фиг.10. Тези показатели са пререгулиране  $\sigma, \%$ , време на

установяване  $t_s$ , време на нарастване  $t_r$  и др. Приведени тези показатели в честотната област са визуализирани на следващата фиг.11. Тук  $B_U$  и  $B_L$  са съответно горна и долна граница, честотната лента  $\omega_{BW}$  и т.н.



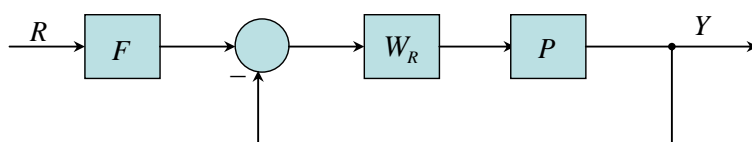
Фиг.10



Фиг.11

## VII. Основи на метод количествена теория на обратната връзка [3,5,6]

Разглежда се система за управление на фиг.12.  $P$  е нелинейният обект,  $F(s)$  е префилтър.



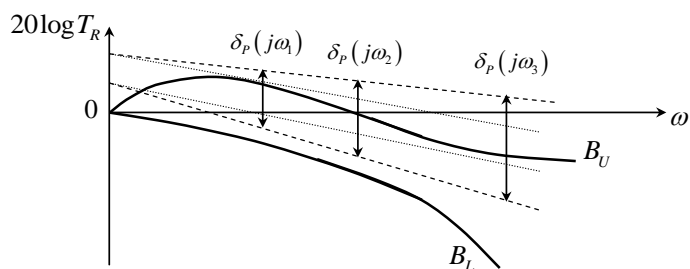
Фиг.12

За да се осъществи синтез по метод КТОВ, е необходимо:

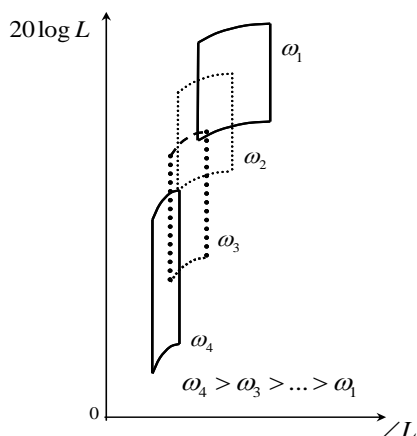
**7.1** Нелинейният обект се описва с набор от  $J$  линейни обекти  $P = \{W_{oi}\} (i = 1, 2, \dots, J)$ , като по този начин се дефинира параметричната неопределеност.

**7.2** Да се обозначи промяната на модула  $\delta_p(j\omega_i)$  - разликата в модулите на отворената система без КТОВ регулатор,  $W_R(s) = 1$ , показано е за обекта от фиг. VII.11.

**7.3** Получаване на зони на неопределеност в равнината Николс за определени честоти  $\omega = \omega_i$ , за всички  $J$  линейни обекти, фиг.13.



Фиг. 12



Фиг.13

**7.5** Получаване на горна и долна граница в равнината на Боде, съобразно зададеното предварително качество, фиг.11.

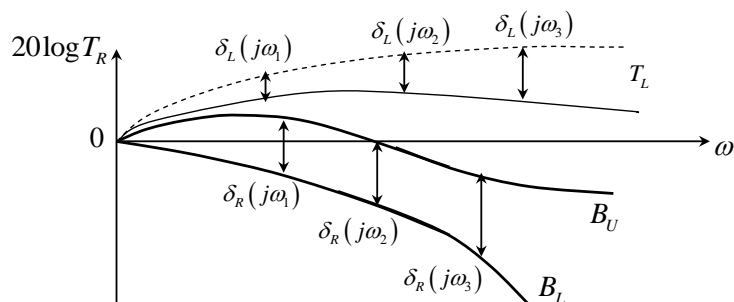
### VIII. Синтез по количествена теория на обратната връзка

Необходимо е:

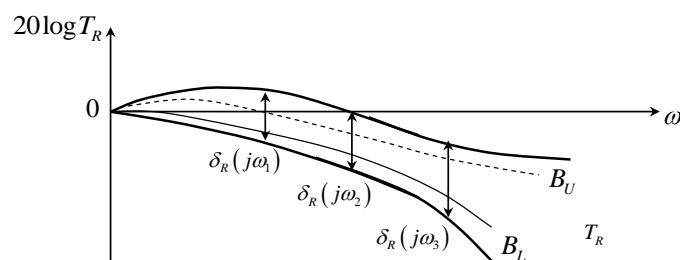
Синтез на регулатор  $W_R(s)$ , фиг.12, така че да се гарантира качество от фиг. 10 и фиг.11.

Резултатната затворена система  $T_L$ , фиг.14 и разликата  $\delta_L(j\omega_i)$  - разлика в модулите на затворената система с КТОВ регулатор, на компенсирания система трябва да е равна или по-малка от  $\delta_P(j\omega_i)$ , така че да е изпълнено неравенството  $\delta_L(j\omega_i) \leq \delta_R(j\omega_i) \leq \delta_P(j\omega_i)$ , където  $\delta_R(j\omega_i)$  е разлика в модулите на затворената система с КТОВ регулатор и префилтър.

Синтез на префилтър, фиг.15, така че да се осигури попадане на характеристиките на затворената система в границите  $B_U$  и  $B_L$ .



Фиг.14



Фиг.15

Следователно метод КТОВ осигурява и гарантира желано качество за предварително известен диапазон на параметрична неопределеност в обекта.

### IX. Предимства на количествена теория на обратната връзка.

В резултат на робастен синтез се получава нечувствителност към структурирана неопределеност. Извършва се само една процедура по робастен синтез за целия работен диапазон на системата. Ограниченията при синтеза са видими от началото до края на прилагането на количествената теория на обратната връзка. Изпълнимо качество може да бъде определено в ранна фаза от синтеза. При необходима промяна в качеството това става бързо, поради наличие на софтуер. Като следствие, печели се време от синтез по КТОВ.

#### ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ:

- [1] Borghesani C., Y. Chait, O. Yaniv, The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox, User's Guide, 3rd ed, Terasoft, Inc., 2003.
- [2] Manuel Díaz J., S. Dormido, J. Aranda, SISO-QFTIT, an Interactive Software Tool for the Design of Robust Controllers Using the QFT Methodology (Version 1.0), User's Guide, Departamento de Informática y Automática, April 2005.
- [3] Houpis C., S. Rasmussen, Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications, Marcel Dekker Inc., 1999.
- [4] Garcia-Sanz M., Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Applications. In Achieving Successful Robust Integrated Control System Designs for 21st Century Military Applications – Part II. Educational Notes RTO-EN-SCI-166, pp. 11-44, 2006.
- [5] Garcia-Sanz M., Houpis C., Wind Energy Systems, Control Engineering Design, CRC Press, 2012.
- [6] Карлова-Сергиева, Проектиране на системи за управление с гарантирано качество, монография, Радикс, 2013.

#### За контакти:

Гл. ас. д-р инж. Весела Карлова –Сергиева, Катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ при факултет „Автоматика“ на Технически университет гр. София, бул. Климент Охридски № 8, п.к. 1756, Тел.: 02 965 3941, e-mail: [vkarlova@gmail.com](mailto:vkarlova@gmail.com)