Számítógépes gyakorlat
MATLAB, Control System Toolbox

Bevezetés

A gyakorlatok célja az irányítási rendszerek korszerű számítógépes vizsgálati és tervezési módszereinek bemutatása, az alkalmazáshoz szükséges alapvető ismeretek átadása.

A MATLAB programcsomagban található Control System Toolbox (CST) az irányítástechnika területén hasznos függvények gyűjteménye. A gyakorlatokon lineáris és időinvariáns (LTI: Linear Time Invariant) rendszerekkel foglalkozunk, a CST az ilyen rendszerek idő- és frekvenciatartománybeli analíziséhez és szintéziséhez nyújt segítséget.

A laboratóriumi gyakorlat célja, hogy a hallgatók

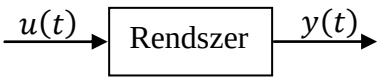
- megismerjék a MATLAB CST alapvető tulajdonságait;
- elsajátítsák a legegyszerűbb utasítások használatát, a MATLAB programozás alapjait;
- átfogó képet kapjanak a CST lehetőségeiről és gyakorlati alkalmazhatóságáról;
- a megszerzett ismereteket felhasználva önállóan megoldjanak egyszerű problémákat.

Dinamikus rendszerek analízise

Az irányított folyamatok általában tartalmaznak valamilyen energiatároló elemet. Mivel az energia megváltozásához időre van szükség, a rendszer jellemzői, kimeneti jelei nem képesek követni a bemenő jelek ugrásszerű megváltozását. A gerjesztés hatása csak valamilyen időfüggvény szerint, késve jelenik meg a kimeneti jelben. Az ilyen rendszereket dinamikus rendszereknek nevezzük.

Folytonos idejű rendszerek

Dinamikus rendszerek modelljét matematikai egyenletek formájában szokás megadni. A rendszer és környezete között, valamint az egyes rendszerelemek között fellépő kölcsönhatásokhoz olyan függvénykapcsolatokat rendelünk, melyek a lehető legjobban leírják a valóságban lejátszódó folyamatokat. Az egyenletek a rendszert érő adott gerjesztésekhez – $u(t)$ bemeneti jelekhez – meghatározott válaszokat – $y(t)$ kimeneti jeleket– rendelnek (1. ábra).



1. ábra. Dinamikus rendszer szimbolikus ábrázolása

Dinamikus rendszerek működésének leírására nemcsak a bemenőjelek és kimenőjelek közötti kapcsolatot leíró összefüggések alkalmasak, hanem a belső állapotváltozók és azok változásai

is. Az állapotváltozók elegendő számú, megfelelően kiválasztott időfüggő tulajdonságok, jelek, melyek a rendszer állapotának teljes és megfelelően pontos leírásához szükségesek. Adott t időpillanatban az $x_1(t)$, $x_2(t)$, …, $x_n(t)$ állapotváltozók értékét a bemenő jelek és az állapotváltozók $x_1(\tau)$, $x_2(\tau)$, …, $x_n(\tau)$ előélete ($\tau < t$) együttesen határozzák meg:

$$\begin{aligned} x_1 &= \varphi_1(t, \tau, x_1(\tau), \dots, x_n(\tau), u_1(t), \dots, u_m(t)) \\ x_2 &= \varphi_2(t, \tau, x_1(\tau), \dots, x_n(\tau), u_1(t), \dots, u_m(t)) \\ \vdots \quad & \quad \vdots \\ x_n &= \varphi_n(t, \tau, x_1(\tau), \dots, x_n(\tau), u_1(t), \dots, u_m(t)) \end{aligned} \tag{1}$$

Sima rendszernél, ahol az állapotváltozók t pillanatbéli aktuális értékeit megadó (1) függvénykapcsolatok legalább egyszer differenciálhatóak, az állapotváltozók mozgását differenciálegyenlet rendszerrel írhatjuk le:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ \dot{x}_2 &= f_2(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ \vdots \quad & \quad \vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \end{aligned} \tag{2}$$

A rendszer megfigyelő számára fontos kimeneti jeleit ($y_1, y_2 \dots y_p$) az állapotváltozók és a bemenő jelek függvényében adhatjuk meg:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ y_2 &= h_2(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ \vdots \quad & \quad \vdots \\ y_p &= h_p(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \end{aligned} \tag{3}$$

Az (2) és (3) egyenleteket a dinamikus rendszerek állapotváltozós modelljének nevezzük. Az egyszerűbb jelölés érdekében az egyenleteket vektoros formában szokás megadni az alábbi jelölésekkel:

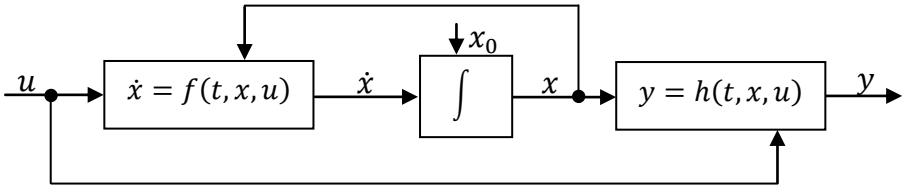
$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \qquad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \qquad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}$$

$$f(t, x, u) = \begin{bmatrix} f_1(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ f_2(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ \vdots \\ f_n(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \end{bmatrix} \qquad h(t, x, u) = \begin{bmatrix} h_1(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ h_2(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \\ \vdots \\ h_p(t, x_1 \dots x_n, u_1 \dots u_m) \end{bmatrix}$$

ahol n az állapotváltozók, m a bemenetek és p a kimenetek száma. A dinamikus rendszerek matematikai modellje így

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t,x,u) \\ y &= h(t,x,u) \end{aligned} \tag{4}$$

alakra hozható, ahol x az állapotváltozók, u a bemenetek, y a kimenetek vektorai, t az idő, f és h pedig általános esetben nemlineáris vektor-vektor függvények. Az egyenletek alapján felrajzolható a sima nemlineáris rendszerek hatásvázlata (2. ábra).



2. ábra. Sima nemlineáris rendszer hatásvázlata

Dinamikus rendszerek vizsgálatakor az (4) egyenletben sokszor nem tüntetjük fel explicit módon az u bemenetet, mert az a visszacsatoláson keresztül az állapotváltozók és az idő függvényében adott:$u = \gamma(t,x)$. Ez az eset egy zárt szabályzási kör vizsgálatakor is. Így egy gerjesztés nélküli rendszert kapunk:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t,x) \\ y &= h(t,x) \end{aligned} \tag{5}$$

Egyszerűbb esetben az (4) egyenlet f és h függvényi nem függnek az időtől, ilyenkor autonóm rendszerről beszélünk:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u) \\ y &= h(x,u) \end{aligned} \tag{6}$$

A dinamikus rendszert input-affin rendszernek nevezzük, ha matematikai modellje az alábbi formában megadható:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t,x) + g(t,u) \\ y &= h(t,x) \end{aligned} \tag{7}$$

Ha az f és h függvények lineárisak, az (4) egyenlet az alábbi speciális formában írható fel:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u \\ y &= C(t)x + D(t)u \end{aligned} \tag{8}$$

A modellalkotás folyamata

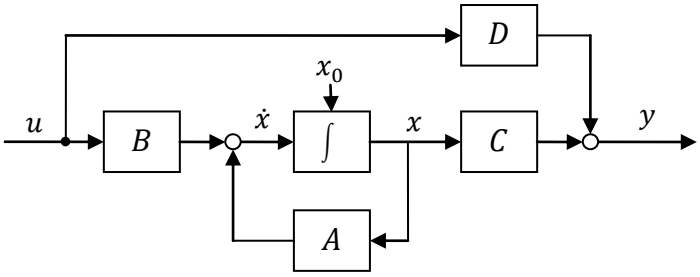
Egy dinamikus rendszer matematikai modelljének meghatározásához néhány fontos kérdést meg kell vizsgálnunk:

- Melyek azok a hatások, amelyeket mindenképpen figyelembe kell venni és melyek azok, amelyek elhanyagolhatóak? A gravitációs gyorsulást pl. szinte minden esetben figyelembe vesszük földi mechanikai rendszerek esetén, a föld forgásából adódó erőket azonban általában nem.
- Az elfogadott tapasztalati törvényszerűségek ismerete mennyiben segíti a modell megalkotását? Míg sok esetben a Newton törvényekkel megfelelően modellezhető egy mechanikai rendszer, néhány komplex berendezés modelljét csak kísérleti úton határozhatjuk meg (pl. szélcsatornás mérések, adatsorok gyűjtése).
- Milyen számítási kapacitás áll rendelkezésre? Minél bonyolultabb egy modell, annál nagyobb műveleti teljesítményt igényel a központi egységtől és a hardverelemektől. Törekedni kell tehát arra, hogy a végső modell minél több egyszerűsítést tartalmazzon.

Folytonos idejű lineáris rendszerek

Mivel a lineáris rendszerek vizsgálatára jól kidolgozott módszerek állnak a rendelkezésünkre, a gyakorlatban a nemlineáris rendszereket gyakran megpróbálják egy adott munkapont környezetében linearizálni. A módszer hátránya, hogy a rendszer viselkedését csak lokálisan, a munkapont körüli kis változások esetén tudja megfelelően leírni, attól távolabb vagy globálisan a lineáris modell sok esetben már nem tükrözi megfelelően a valóságban lejátszódó folyamatokat.

Analízis az időtartományban



3. ábra. Lineáris rendszer hatásvázlata

Lineáris rendszerekre a (8) egyenlet alapján, idő független rendszermátrixok esetén a 3. ábra hatásvázlata rajzolható fel. Adott $u(t)$ bemenőjel és $x(0) = x_0$ kezdeti értékek esetén a kimeneti jel meghatározásához meg kell oldani az állapotegyenletet és a kimeneti egyenletet:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{9}$$

Az állapotegyenlet megoldásához rendezzük a baloldalra az állapotváltozókat tartalmazó kifejezéseket, majd mindkét oldalt szorozzuk meg e^{-At}-vel:

$$\begin{aligned} \dot{x} - Ax &= Bu \\ e^{-At}(\dot{x} - Ax) &= e^{-At}Bu \\ e^{-At}\dot{x} - e^{-At}Ax &= e^{-At}Bu \end{aligned} \tag{10}$$

felhasználva a

$$\frac{d}{dt}e^{At} = Ae^{At} = e^{At}A \tag{11}$$

összefüggéseket, a zárójel felbontásával kapott kifejezés felírható a két időfüggvény szorzatának idő szerinti deriváltjaként:

$$\frac{d}{dt}[e^{-At}x(t)] = e^{-At}Bu(t) \tag{12}$$

Mindkét oldalt megszorozva dt-vel, majd integrálva t_0-tól t-ig:

$$e^{-At}x(t) - e^{-At_0}x(t_0) = \int_{t_0}^{t} e^{-A\tau}Bu\,(\tau)d\tau \tag{13}$$

Az (13) egyenletet átrendezve és felhasználva, hogy $[e^{-At}]^{-1} = e^{At}$ állapotegyenlet megoldása a következő két szokásos alakban adható meg:

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{A(t-t_0)}x(t_0) + e^{At}\int_{t_0}^{t} e^{-A\tau}Bu(\tau)\,d\tau \\ x(t) &= e^{A(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^{t} e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)\,d\tau \end{aligned} \tag{14}$$

Az állapotváltozók mozgását megadó fent egyenletek két részre bonthatók: az első a rendszer saját mozgását adja meg, amely kizárólag az $x(t_0)$ kezdeti feltételtől függ:

$$e^{A(t-t_0)} = \Phi(t, t_0) \tag{15}$$

ahol $\Phi(t, t_0)$ az állapotátviteli mátrix. A második összetevő, ami egy konvolúciós integrál a rendszer $u(t)$ bemenő jeltől függő gerjesztett mozgását írja le zérus kezdeti feltétel esetén:

$$\int_{t_0}^{t} e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)\,d\tau \tag{16}$$

Az $y(t)$ kimeneti jel az $x(t)$ állapotváltozó ismeretében a kimeneti egyenletből felírható:

$$y(t) = Ce^{A(t-t_0)}x(t_0) + C\int_{t_0}^{t} e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)\,d\tau + Du(\tau) \tag{17}$$

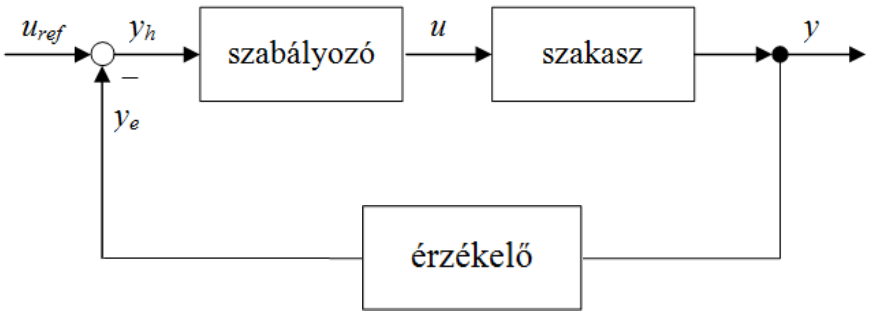
A megoldásban szereplő integrál csak egyszerű függvényekkel leírt gerjesztés esetén határozható meg zárt formában, egyéb esetekben numerikus módszerekkel számítható. Az exponenciális mátrixfüggvény közelítő számításához felhasználhatjuk annak hatványsorát:

$$e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k!}t^kA^k = I + tA + \frac{1}{2!}t^2A^2 + \frac{1}{3!}t^3A^3 + \cdots \tag{18}$$

Irányítási rendszerek

Alapfogalmak

Az irányítás egy folyamatba történő beavatkozás adott cél megvalósítása érdekében. A folyamat változása külső, belső hatások következtében jön létre. A folyamat jellemzőit és a külső hatásokat jelek testesítik meg. A nyílt hatásláncú, visszacsatolást nem tartalmazó irányítást vezérlésnek, a zárt hatásláncú, visszacsatolást tartalmazó irányítást szabályozásnak nevezzük. Az irányító berendezés a mért vagy más úton szerzett adatok alapján, az irányítás céljának megfelelően megváltoztatja az irányított folyamat (szakasz) jellemzőit. Az irányított folyamat és az irányító berendezés együttesen alkotja az irányítási rendszert. A továbbiakban csak zárt irányítási rendszerekkel (szabályozásokkal) foglalkozunk.



4. ábra. Zárt szabályozási kör hatásvázlata

A szabályozási rendszer működését a 4. ábra hatásvázlatán követhetjük végig. Az y szabályozott jellemzőt az érzékelő szerv méri, amelynek kimeneti jele az y_e ellenőrző jel. A szabályozott jellemző előírt értékét – referencia értéket – az u_{ref} külső jel (alapjel) adja meg. Az alapjel és az ellenőrző jel különbsége az y_h hibajel. A hibajel hatására a szabályzó, a hibajel megszüntetése érdekében, a szakasz u bemeneti jelén keresztül beavatkozik az irányított folyamat működésébe, vagyis igyekszik a szabályozott jellemző referencia jeltől való eltérését megszüntetni.

Az alapjel időbeni lefutása alapján a szabályozások két csoportra oszthatók:

- Időben állandó referencia jel esetén értéktartó szabályozásról beszélünk. Ekkor a szabályzó feladata, hogy a zavaró hatások ellenére a szabályozott jellemzőt állandó értéken tartsa.
- Időben változó referencia jel esetén értékkövető szabályozásról beszélünk. Ekkor a szabályzó feladata, hogy a szabályozott jellemző a zavaró hatások ellenére minél pontosabban kövesse az alapjel változásait.

A szabályozott rendszerrel szemben támasztott követelmények:

- Legyen stabil, vagyis egyensúlyi állapotából kimozdítva a rendszert, azután magára hagyva, térjen vissza egyensúlyi állapotába. Másképpen fogalmazva, korlátos bemeneti jel hatására a kimeneti jel korlátos mértékben változzon meg.

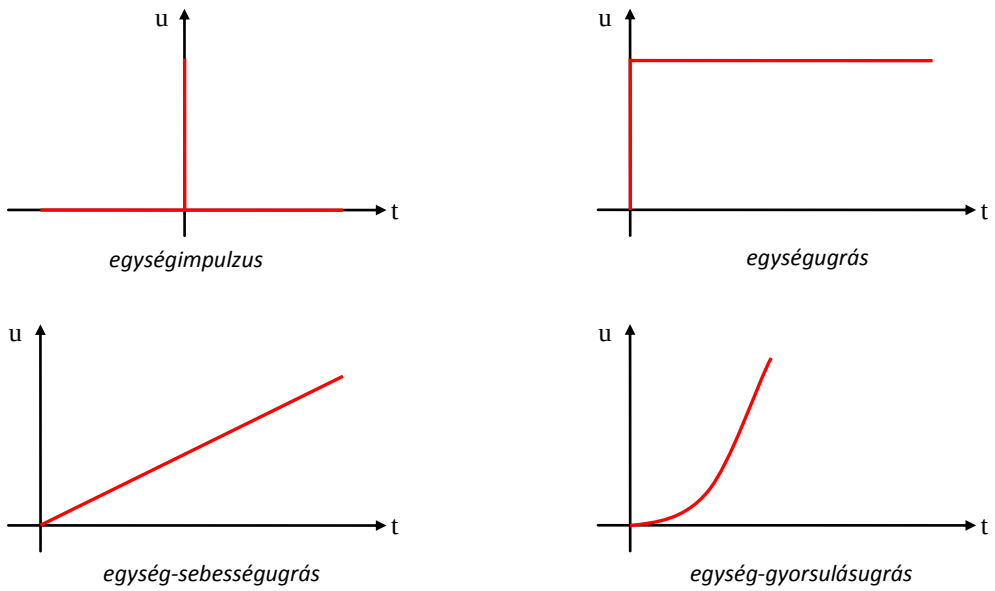
- Az alapjelet megfelelően kövesse, vagyis az alapjeltől való eltérés (a hibajel) legyen minimális. Másképpen fogalmazva, a statikus hiba értéke közelítsen zérushoz.
- A zavaró jelek hatását minimalizálja.
- A paraméterváltozásokra kellően érzéketlen legyen.
- Megfeleljen az egyéb követelményeknek.

Szabályozási rendszerek tervezésekor megpróbálunk minél több előzetes információt szerezni a szabályozott szakasz tulajdonságairól. Ez azt jelenti, hogy megpróbálunk meghatározni egy olyan – lehetőleg egyszerű – matematikai modellt, amely kielégítő pontossággal utánozza a valóságos szakaszban lejátszódó folyamatokat. A modellel leírjuk a szakasz bennünket érdeklő bemeneti és kimeneti jelei közötti törvényszerűségeket, vagyis a rendszer jelátviteli tulajdonságait. A modell alapján, szisztematikus matematikai módszerek és szimulációk segítségével megtervezzük a szakaszhoz legmegfelelőbb szabályzó struktúrát. Ezt a módszert modell alapú tervezésnek nevezzük.

Analízis az időtartományban

A szabályozási kör hatásvázlatában (4. ábra) szereplő egységek, tagok (szakasz, érzékelő, szabályzó) mindegyike jellemezhető valamilyen átviteli tulajdonsággal, amely megadja, hogyan változik a tag kimeneti jele a tag bemeneti jelének függvényében. Ezeket az átviteli jellemzőket az időtartományban különböző alakú bemenő vizsgálójelekre (gerjesztésekre) adott kimeneti válasz alapján határozzuk meg. A tipikus vizsgáló jelek (5. ábra):

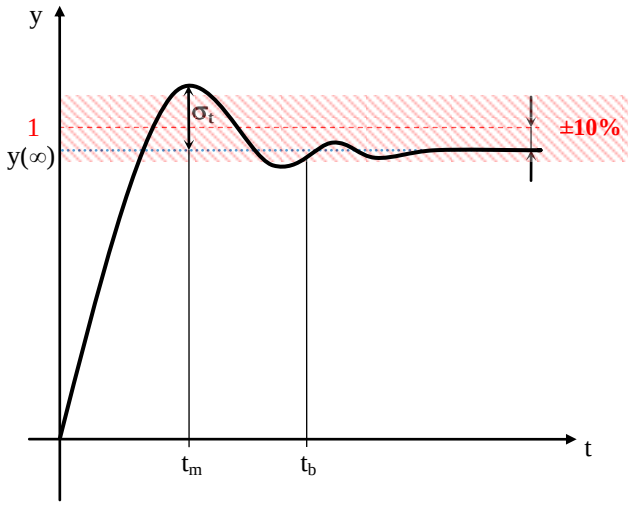
- egységimpulzus: $u(t) = 1$ ha $t = 0$; $u(t) = 0$ ha $t \neq 0$
- egységugrás: $u(t) = 0$ ha $t < 0$; $u(t) = 1$ ha $t \geq 0$
- egység-sebességugrás: $u(t) = 0$ ha $t < 0$; $u(t) = t$ ha $t \geq 0$
- egység-gyorsulásugrás: $u(t) = 0$ ha $t < 0$; $u(t) = t^2$ ha $t \geq 0$



5. ábra. Tipikus vizsgáló jelek

Az egységugrás gerjesztésre adott válasz, más néven a rendszer átmeneti függvénye (6. ábra) alapján a következő rendszerjellemzőket definiálhatjuk:

- Statikus hiba h_s: az alapjel és a rendszer egyensúlyi állapotában (a lengések lecsengését követően) kialakult kimeneti jelének aránya. Általában az alapjel százalékában megadott érték pl. ±10% megengedett statikus hiba az alapjelhez képest.
- Túllendülés σ_t: A kimeneti jel maximális, és állandósult állapotban (t = ∞) kialakult értékének különbsége. Általában az állandósult állapotbeli érték százalékában adott pl. 15% megengedett túllendülés az állandósult állapotbeli értékhez képest.
- Beállási idő t_b: Az az időpont, ami után a kimeneti jel már nem lép ki a megengedett statikus hiba sávból.
- Átviteli tényező K: a kimeneti és bemeneti jel állandósult állapotbeli értékének hányadosa. Ha a K tényező 1-nél nagyobb érték (vagyis a kimeneti jel nagyobb, mint a bemeneti jel) erősítésről, ellenkező esetben csillapításról beszélünk. Számítása $K = J_{ki}(t = \infty)/J_{be}$

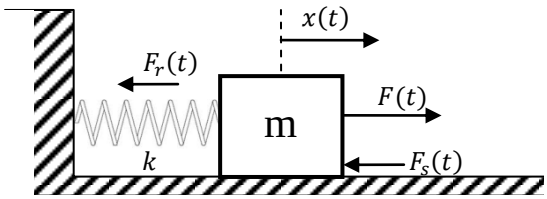


6. ábra. A rendszer egységugrás válaszából meghatározható jellemzők

Ezekre a jellemzőkre a szabályzási feladat függvényében lehetnek elvárások és megkötések, amit a zárt szabályozási körnek teljesítenie kell. A szabályzót tehát úgy kell megtervezni, hogy ezek az elvárások teljesüljenek.

Gyakorló feladatok

1. Rugós mechanikai rendszer



7. ábra. Rugós mechanikai rendszer

Az 7. ábra látható mechanikai rendszerben egy k rugóállandójú rugóval rögzített m tömegű test, adott b súrlódási együtthatójú vízszintes síkon mozog. A testre az $F(t)$ külső erőn kívül az $x(t)$ kitéréssel arányos $F_r(t) = kx(t)$ rugó-erő, és a test sebességével arányos $F_s(t) = b\dot{x}(t)$ súrlódási erő hat. A Newton egyenletből felírható a mechanikai rendszer differenciálegyenlete:

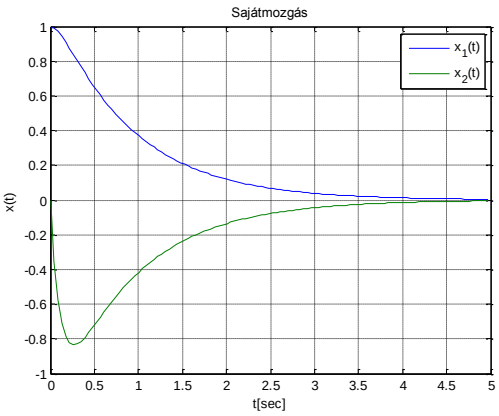
$$m\ddot{x}(t) = F(t) - kx(t) - b\dot{x}(t) \tag{1}$$

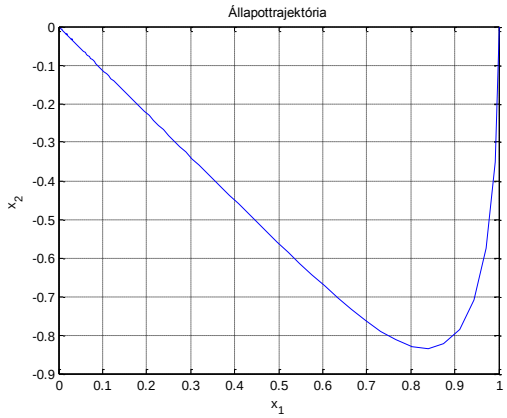
A másodrendű differenciálegyenlet alapján két állapotváltozó $(x_1(t) = x(t), x_2(t) = \dot{x}(t))$ jelölhető ki. Az $u(t) = F(t)$ bemeneti jel és az $y(t) = x_1(t)$ kimeneti jelekkel felírható a rendszer állapotegyenlete és kimeneti egyenlete:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u(t)$$
$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \tag{2}$$

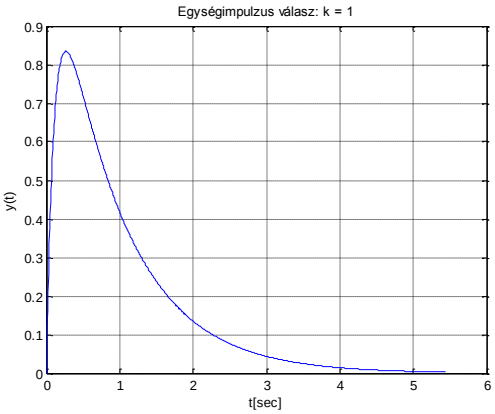
Legyenek a rendszer paraméterek: k = 1 N/m, m = 0.1 kg, b = 1 N/(m/s).

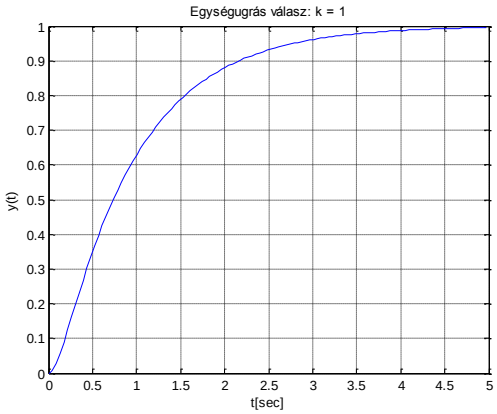
a) Számítsa ki a rendszer A állapotmátrixának sajátértékeit
b) $x_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ kezdeti feltételekre vizsgáljuk meg a rendszer sajátmozgását és adjuk meg az állapottrajektóriát.



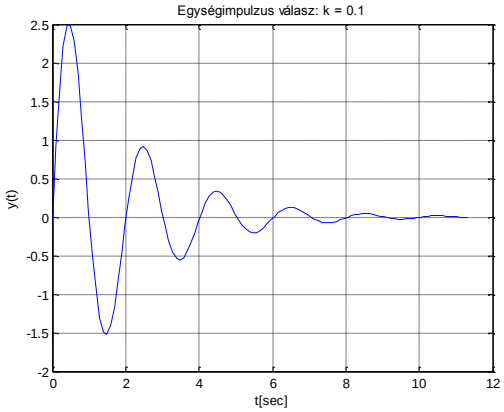


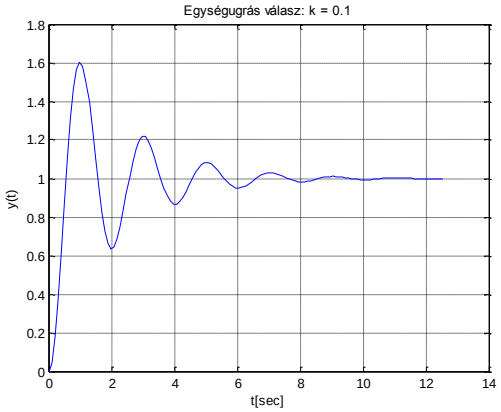
c) Adjuk meg a rendszer egységimpulzus és egységugrás bemeneti jelekre adott válaszait.



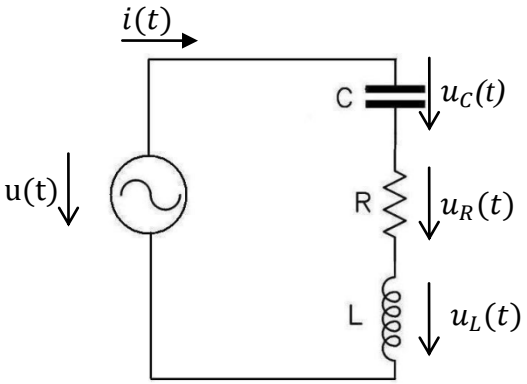


d) Hasonlítsuk össze a c) pontban kapott eredményeket a k = 1 N/m, m = 0.1 kg, b = 0.1 N/(m/s) paraméterekkel rendelkező rendszer egységimpulzus és egységugrás bemeneti jelekre adott válaszaival. A kapott $y(t)$ egységugrás válasz időfüggvény alapján határozza meg a σ_t túllendülést és a t_b beállási időt, ha a megengedett hibasáv ±10%.





2. RLC kör analízise



8. ábra. RLC kör

A 8. ábra látható RLC áramkör működését az ellenálláson, a kondenzátoron és a tekercsen eső feszültség és a rajtuk átfolyó áram közötti összefüggések határozzák meg:

$$u_L(t) = L\frac{di(t)}{dt} \qquad i(t) = C\frac{du_C(t)}{dt} \qquad u_R(t) = Ri(t) \tag{3}$$

Behelyettesítéssel kapjuk, hogy

$$u_L(t) = LC\frac{d^2u_C(t)}{dt^2} \qquad u_R(t) = RC\frac{du_C(t)}{dt} \tag{4}$$

Kirchoff huroktörvénye alapján felírható az

$$\begin{gathered} u(t) = u_C(t) + u_R(t) + u_L(t) \\ u(t) = u_C(t) + LC\frac{d^2u_C(t)}{dt^2} + RC\frac{du_C(t)}{dt} \end{gathered} \tag{5}$$

differenciálegyenlet. Átrendezve az egyenletet

$$\frac{d^2u_C(t)}{dt^2} = -\frac{1}{LC}u_C(t) - \frac{R}{L}\frac{du_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC}u(t) \tag{6}$$

A kondenzátoron eső $u_C(t)$ feszültséget és idő szerinti deriváltját állapotváltozónak tekintve az egyenletből felírható az RLC kör állapotegyenlete:

$$\begin{gathered} x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_C(t) \\ \dot{u}_C(t) \end{bmatrix} \\ \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{LC} \end{bmatrix} u(t) \end{gathered} \tag{7}$$

A lehetséges kimeneti jelek bármelyike előállítható az állapotváltozók és a bemeneti jel lineáris kombinációjaként:

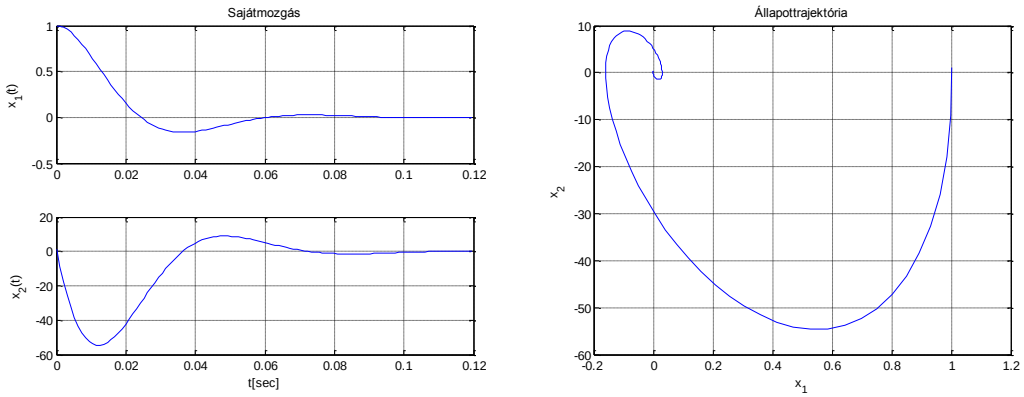
$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_C(t) \\ u_R(t) \\ u_L(t) \\ i(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & RC \\ -1 & -RC \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \tag{8}$$

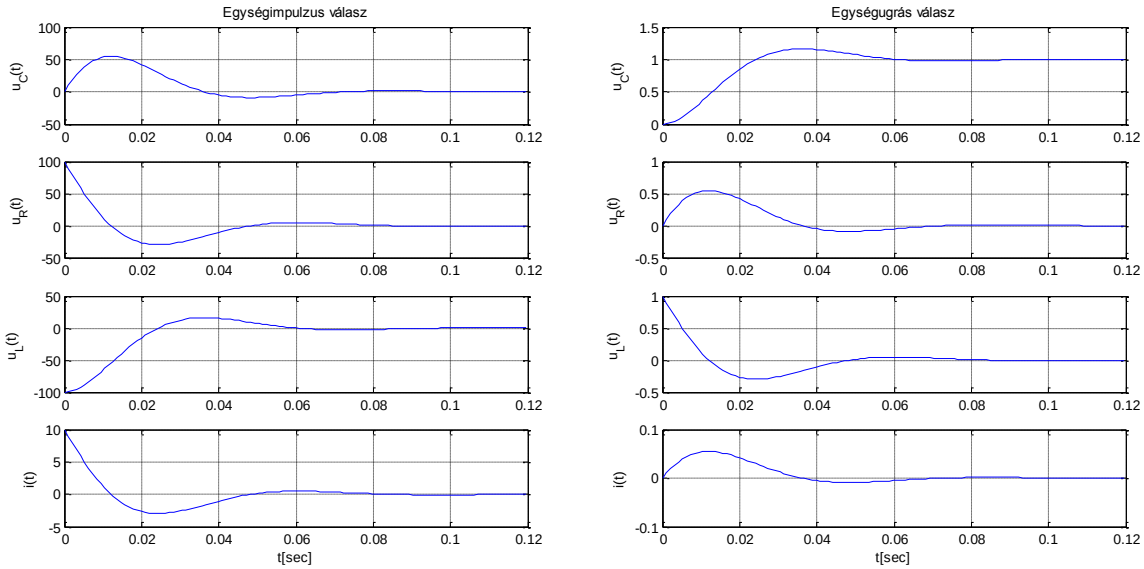
Legyenek az áramköri paraméterek: R = 10 Ω, C = 1000 μF és L = 100 mH.

a) Számítsa ki a rendszer A állapotmátrixának sajátértékeit

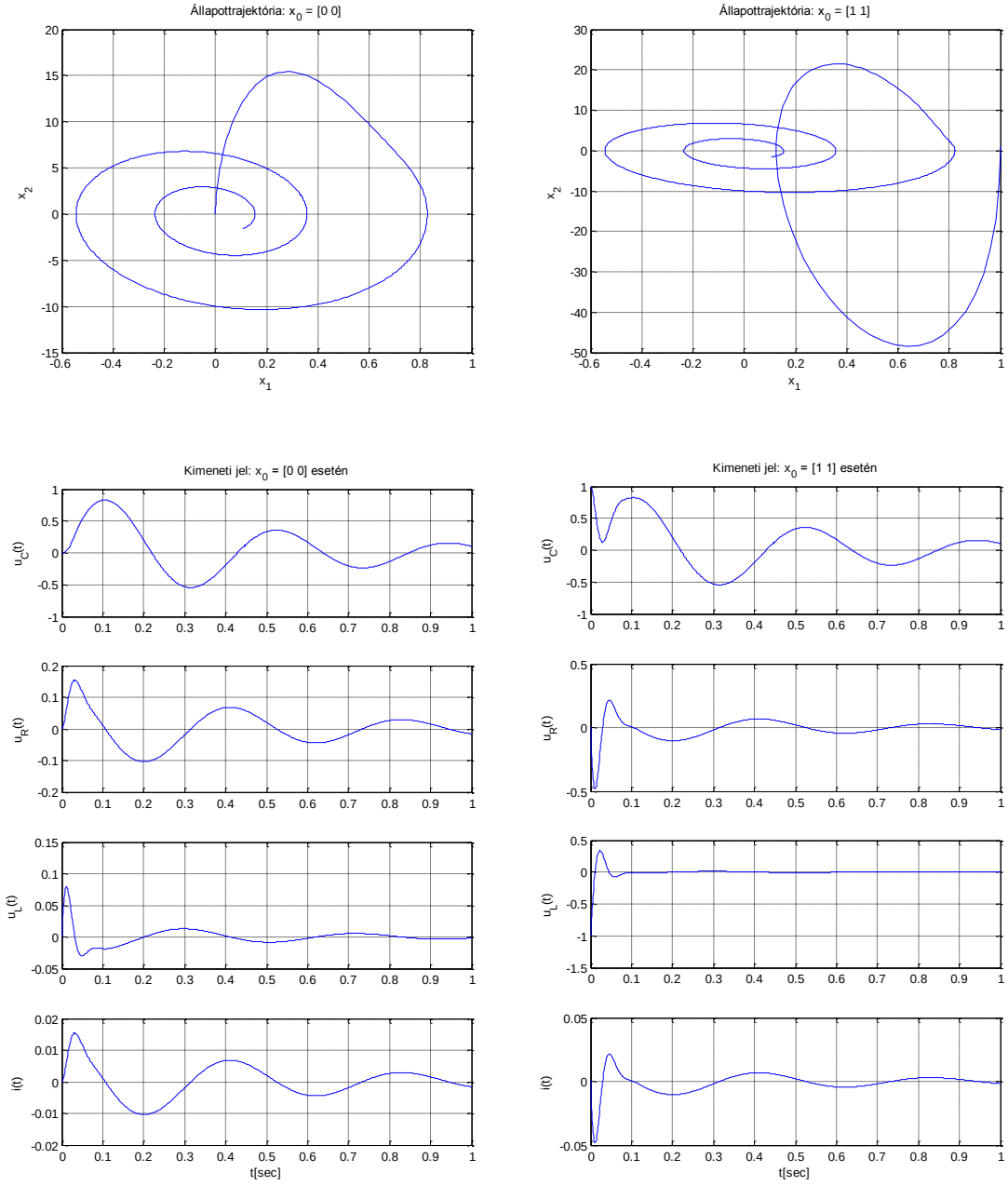
b) $x_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ kezdeti feltételekre vizsgáljuk meg a rendszer sajátmozgását és adjuk meg az állapottrajektóriát.



c) Adjuk meg a rendszer egységimpulzus és egységugrás bemeneti jelekre adott válaszait. A kapott $u_C(t)$ egységugrás válasz időfüggvény alapján határozza meg a σ_t túllendülést és a t_b beállási időt, ha a megengedett hibasáv ±5%.



d) $u(t) = e^{-2t} \cdot \sin(15t)$ bemeneti jelre, $x_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ és $x_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ kezdeti feltételek esetén adja meg az állapottrajektóriát és a kimenő jelek időfüggvényeit a $0 \leq t \leq 1$ tartományban.



Hivatkozások, felkészüléshez ajánlott irodalom

- Morócz I.: Irányítástechnika I., KKMF-1164, Budapest
- Lantos Béla: Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I. Egyváltozós szabályozások. Akadémiai Kiadó, 2. kiadás, 2005, ISBN 963 05 8249 X