

V. Zanchi
Elektrotehnički fakultet - Split

DINAMIKA KONTRAKCIJE MIŠIĆA

UVOD

Veliki interes vlada za kontroliranu stimulaciju mišića. Detaljno poznavanje dinamičkih karakteristika, električki stimuliranih mišića predmet je mnogih istraživanja(1). Krajnji cilj tih istraživanja je kontrolirano upravljanje skeletnim mišićima kod paraliziranih ljudi.

Električki stimulirani mišići kontrahiraju se i preko koštanog sistema izazivaju zakretni moment. Odnos tog momenta i stimulacijskog napona može se definirati prenosnom funkcijom. Karakter te prenosne funkcije je problem koji se obrađuje u ovom radu.

Izbor prenosne funkcije, koja se bazira na rezultatima mjerenja, opravdati će se i sa stanovišta kemijske kinetike.

MJERENJA

Mjerilo se na nozi zdravih ljudi. Mjerenja su se sastojala u tome da se je vršila naponska uzbuda mišića Tibialis Anterior i istovremeno se mjerio zakretni moment kojeg razvija stopalo. Izvršena su mjerenja fazne karakteristike i mjerenja prelazne pojave.

Mjerenje fazne karakteristike vršilo se metodom elipse. Kao uzbuđni napon koristio se poluvalno ispravljeni sinusno modulirani slijed impulsa. Frekvencije sinusnog napona kod

kojih se mjerilo, bile su $f = 0,05$, $0,1$, $0,2$ i $0,5$ Hz. Impulsi koje moduliramo ponavljaju se frekvencijom od 65 Hz, a trajanje im je 0,3 msek. Rezultirajuće krivulje upisivali smo na X-Y pisaču. Stimulacijski napon dovodio se na X ulaz pisača. Na Y ulaz pisača dovodio se napon koji je proporcionalan momentu što ga razvija stopalo tokom uzbude mišića. Uredjaj za linearno pretvaranje zakretnog momenta u napon konstruiran je u Laboratoriju Zavoda za Medicinsku Elektroniku - Elektrotehnički fakultet - Ljubljana.

Na slici 1. dani su rezultati mjerenja s odgovarajućim podacima. Zbog poluvalne uzbude na slikama imamo samo dio elipse. Također postoje odstupanja od elipse zbog reakcije mišića na uzbudu tek iznad donjeg praga osjetljivosti(2), kao i zbog nepotpune relaksacije osobe na kojoj se vršilo mjerenje. Na slici 1. također su označene veličine a i A koje se koriste za proračun faznog zakreta ($\mathcal{C} = \text{arc sin } a/A$).

Koristeći podatke krivulja na slici 1. dobili smo rezultate za fazni zakret \mathcal{C} , koji su dani u Tablici I.

f [Hz]	0,05	0,1	0,2	0,5
\mathcal{C} [°]	-0	-8	-18	-90

Tablica I. - Fazni zakret \mathcal{C}

Mjerenje prelazne pojave vršilo se tako da se je stimulirao mišić slijedom impulsa, moduliranih step funkcijom i snimala odzivna funkcija (zakretni moment stopala). Napon koji indicira početak stimulacije i napon proporcionalan zakretnom momentu kojeg razvija stopalo ucrtavali su se na traku dvokanalnog pisača.

Rezultati mjerenja prikazani su na slici 2.

IZBOR PRENOSA

Imajući u vidu oblik prelazne karakteristike prikazane na slici 2. potražili smo takovu prenosnu funkciju, čiji odziv na step funkciju najbolje aproksimira mjerenjima dobivenu prelaznu pojavu. Spomenuta prenosna funkcija je oblika :

$$W(s) = e^{-s\tau} \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad /1/$$

Pri analizi odziva od bitnog je interesa dio za $t \geq \tau$, pa ćemo zbog pojednostavljenja smatrati da odziv počinje u času $t = \tau$, odnosno da je tada $t = 0$.

Aperiodički prenos drugog reda $k/(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)$, imati će odziv na jediničnu step funkciju oblika :

$$h(t) = k \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right) 1(t) \quad /2/$$

a odziv na Dirac-ovu funkciju oblika :

$$w(t) = \frac{k}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) 1(t) \quad /3/$$

Analizom funkcije $h(t)$ i odziva prikazanog na slici 2. dobili smo vrijednosti za konstante : $\tau = 0,2$ sek., $T_1 = 0,2$ sek., $T_2 = 0,08$ sek. i $k = 18,7 \cdot 10^{-3}$ kp m/V,

Na slici 3. prikazana je mjerena i računana krivulja s usvojenim vrijednostima konstanti.

Zbog veće sigurnosti u tačnost izbora vrijednosti konstanta, a s time i pravilnog izbora prenosa, usporediti ćemo fazni zakret φ koji unosi prenos :

$$\frac{W(s)}{k} = e^{-0,2s} \frac{1}{(0,2s+1)(0,08s+1)} \quad /4/$$

s faznim zakretom φ kojeg smo dobili mjerenjem fазne karakteristike. U Tablici II. dane su vrijednosti za fazni zakret sistema pod /4/.

f [Hz]	0,05	0,1	0,2	0,5
$\varphi [^\circ]$	-7	-17	-34	-82

Tablica II. - Fazni zakret e'

Usporedimo li rezultate za φ i e' dobivamo zadovoljavajuće podudaranje vrijednosti.

KINETIKA KEMIJSKIH REAKCIJA

Neposredni izvor energije za kontrakciju mišića je adenzotriposfat (ATP) (3). On odcjepljuje molekulu fosforne kiseline i prelazi u adenzodifosfat (ADP), oslobađajući pri tome energiju od 11,9 Cal/mol, koja se na nepoznati način transformira u mehaničku energiju. Ta kemijska reakcija je enzimski katalizirana, a aktivira se preko kalcijevih iona. Cio taj kemijski proces započinje, pošto je izvršena stimulacija mišića.

Vremenski period koji prodje od stimulacije do aktivizacije gore spomenutog kemijskog procesa definiran je u prenosu pod /1/ članom e^{-sz} .

Nakon aktivizacije nastupa spomenuta kemijska reakcija. Vremenski tok funkcije količine nastalog produkta tokom te kemijske reakcije trebao bi odgovarati po karakteru funkciji odziva skeletno - mišićnog sistema na step funkciju. Opravdanost te tvrdnje objašnjavamo time što znamo da je količina kemijske energije, a preko nje i mehaničke, koja se razvija tokom kemijske reakcije, proporcionalna količini nastalog produkta.

Opravdanost gornjih razmatranja, potvrdila je usporedba zakona kemijske kinetike s mjerenim dinamičkim karakteristikama. Prema zakonima kemijske kinetike (4), enzimski katalizirana kemijska reakcija može se podijeliti u tri faze, kao što je prikazano na slici 4.

Dio AB odgovara "tranzientnoj fazi" kemijske reakcije i definiran je zakonom :

$$x = K_1 t^2 \quad \text{do } t \leq 10^{-4} \text{ sek} \quad /5/$$

gdje je : x - količina nastalog produkta
 t - vrijeme

Dio BC odgovara ustaljenom stanju kemijske reakcije i definiran je Henrijevom jednadžbom, koja za naš slučaj glasi:

$$x = K_2 t \quad /6/$$

Dio CD nastupa s porastom vremena, gdje zbog redukcije enzima količina produkta x mijenja se s vremenom po zakonu:

$$x = K_3 (1 - e^{-kt}) \quad t \rightarrow \infty \quad /7/$$

Budući da je za nas od bitnog značaja samo karakter vremenske funkcije, K_1 , K_2 , K_3 i k nećemo pobliže definirati.

USPOREDBA ZAKONA KEMIJSKE KINETIKE S MJERENOM DINAMIČKOM KARAKTERISTIKOM SKELETNO MIŠIČNOG SISTEMA

Želimo pokazati da se funkcija $h(t)$ u odgovarajućim vremenskim periodima ponaša prema istim zakonima koje daje kemijska kinetika.

Za vrlo mala vremena ($t \leq 10^{-4}$ sek) analizirati ćemo funkciju $w(t)$ (pod /3/). Rastavimo li članove $e^{-t/T}$ u red potencija i zanemarimo članove s višim potencijama, funkcija $w(t)$ poprima oblik :

$$w(t) = \frac{k}{T_1 T_2} t l(t) \quad \text{za } t \ll \quad /8/$$

Znamo da ako je derivacija funkcije linearna funkcija, originalna funkcija biti će kvadratna funkcija vremena. Prema tome u našem slučaju funkcija $h(t)$, biti će kvadratna funkcija vremena za $t \ll$, te po obliku odgovara funkciji koja definira "tranzientnu fazu" kemijske reakcije.

Numeričkom analizom funkcije $h(t)$ pokazalo se da je u vremenskom periodu $t = 0,1$ do $0,25$ sek. linearna, što odgovara

BC dijelu krivulje na slici 4., odnosno ustaljenom stanju kemijske reakcije, koja se također odvija po linearnom zakonu.

S porastom vremena $t \rightarrow \infty$ ($t > 0,3$ sek.), uticaj člana $e^{-t/T}$ u funkciji $h(t)$ postaje zanemariv i ta funkcija tada po obliku odgovara dijelu krivulje CD na slici 4. odnosno zakonu kemijske reakcije pod /7/.

ZAKLJUČAK

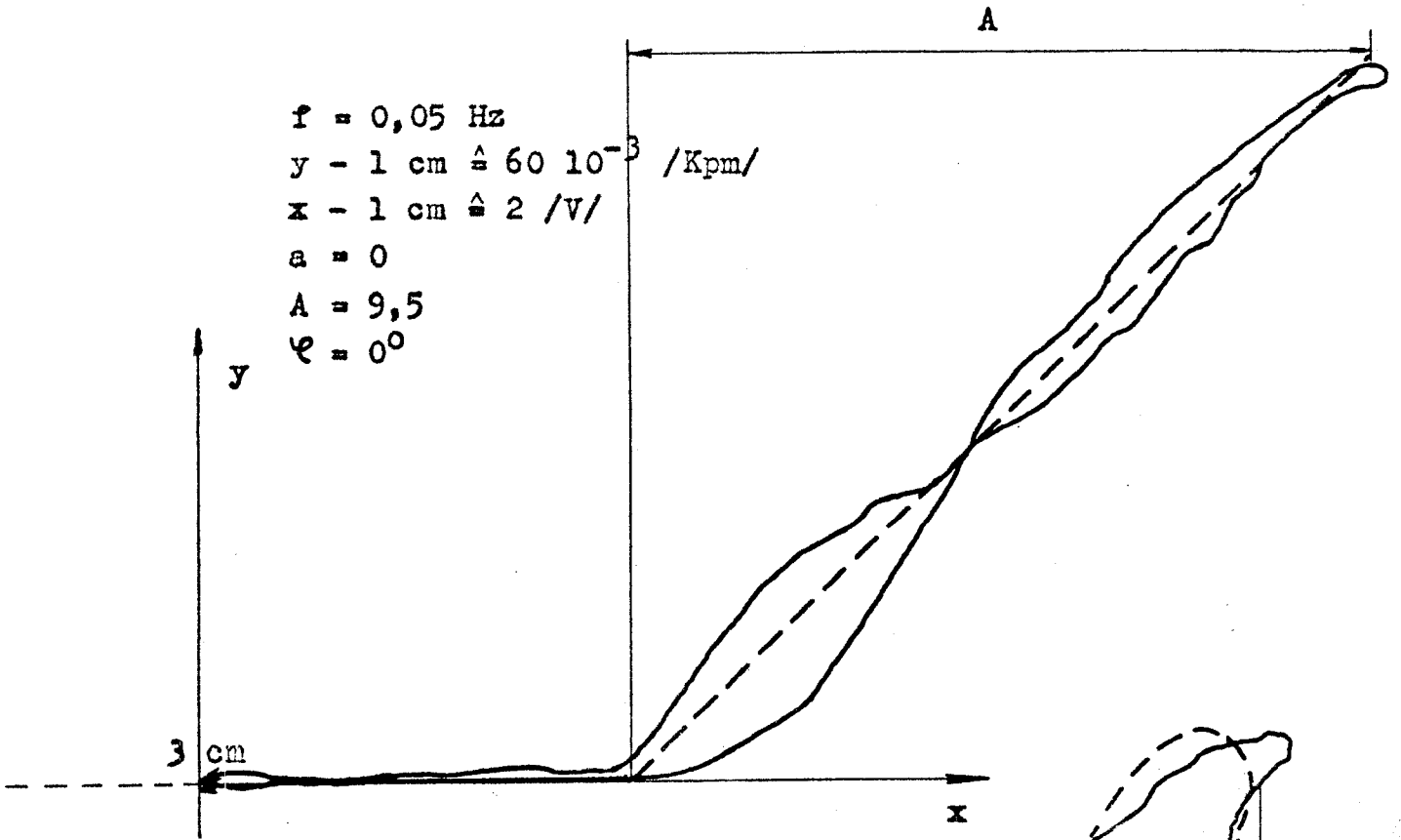
Opravdanost izbora predloženog prenosa potvrđena je dvostrukim mjerenjem. Pretpostavka o proporcionalnoj vezi količine nastalog produkta i razvijenog zakretnog momenta također se pokazala opravdanom. Istovremeno zakoni kemijske kinetike opravdavaju izbor prenosa u predloženom obliku.

Na kraju potrebno je primijetiti da je sinteza vršena na temelju rezultata mjerenja kod samo jedne amplitude uzbuđenog napona, i da je dobiveni prenos tek linearni model. U daljnjem radu biti će potrebno izvršiti modifikaciju tog modela, budući da mjerenja kod raznih amplituda pokazuju izrazite nelinearnosti.

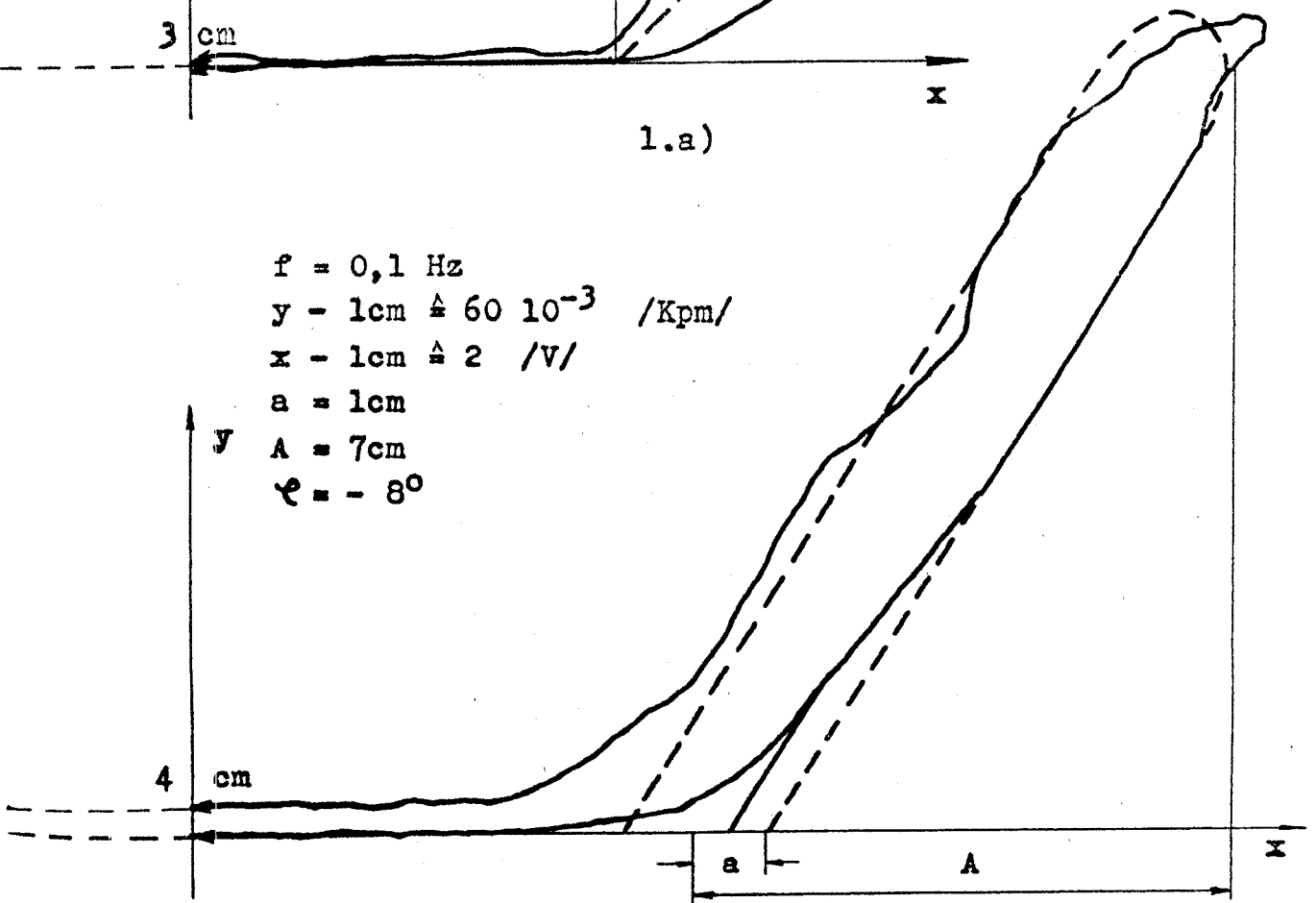
LITERATURA

1. L.Vodovnik - The Dynamic Response of a Musculo-Skeletal System due to Electrical Stimulation; Case Institute of Technology, Report No EDC 4-64-10., 1964 g.
2. L.Vodovnik - Osnove Biokibernetike, Univerza v Ljubljani, 1968.
3. Ruch-Patton- Physiology and Biophysics, Saunders Com. 1960.
4. K.J.Laidler- The Chemical Kinetics of Enzyme Action, Oxford University Press, 1958.

Sva mjerenja vršena su u Laboratoriju Zavoda za Medicinsku Elektroniku pri Elektrotehničkom fakultetu u Ljubljani, u okviru ugovora s Ministarstvom SAD-a za zdravstvo, vaspitanje i socialnu zaštitu, projekt SRS - Yugo - 23-68.



1.a)

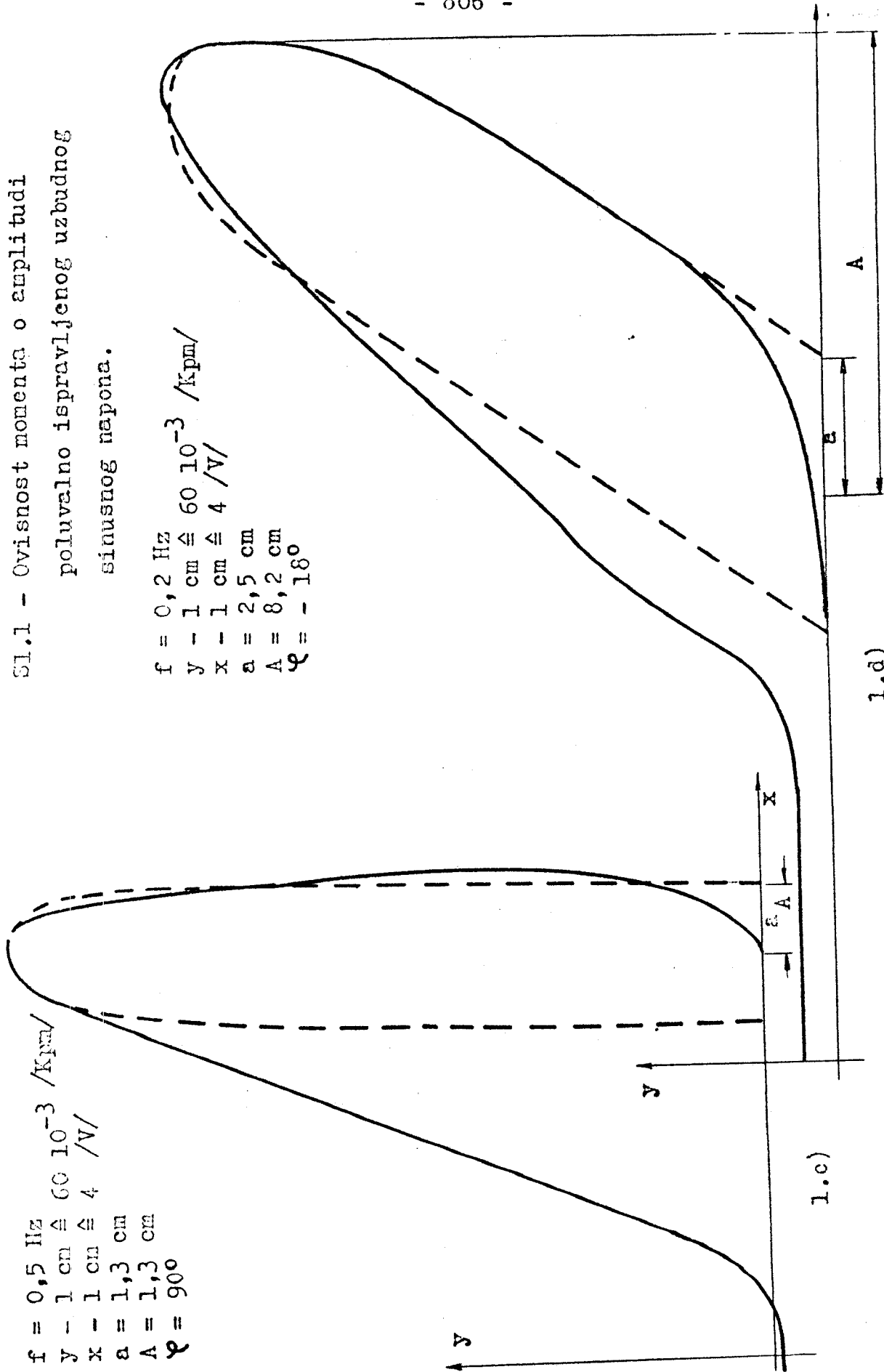


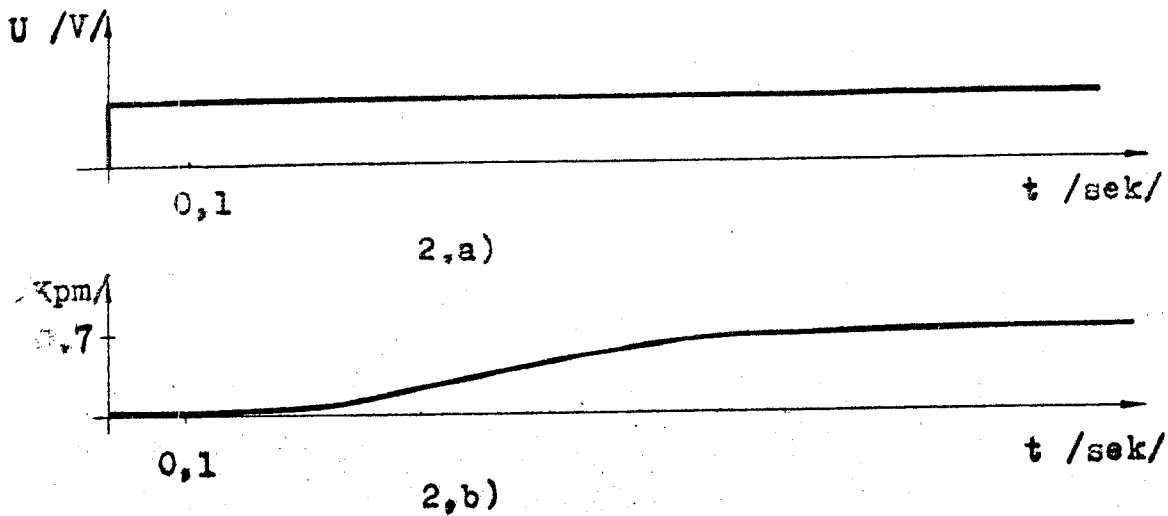
1.b)

Sl.1 - Ovisnost momenta o amplitudi
 poluvalno ispravljjenog uzbudnog
 siasnog napona.

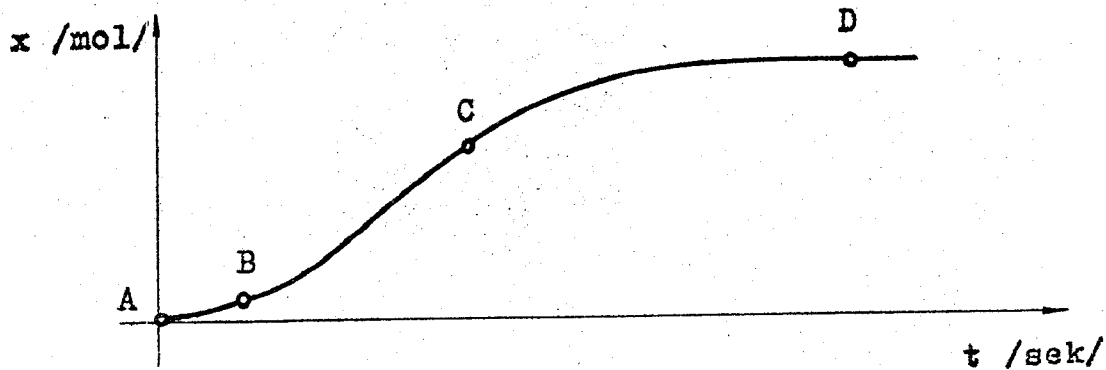
$f = 0,5 \text{ Hz}$
 $y = 1 \text{ cm} \hat{=} 60 \cdot 10^{-3} \text{ /Kpm/}$
 $x = 1 \text{ cm} \hat{=} 4 \text{ /V/}$
 $a = 1,3 \text{ cm}$
 $A = 1,3 \text{ cm}$
 $\varphi = 90^\circ$

$f = 0,2 \text{ Hz}$
 $y = 1 \text{ cm} \hat{=} 60 \cdot 10^{-3} \text{ /Kpm/}$
 $x = 1 \text{ cm} \hat{=} 4 \text{ /V/}$
 $a = 2,5 \text{ cm}$
 $A = 8,2 \text{ cm}$
 $\varphi = -180^\circ$

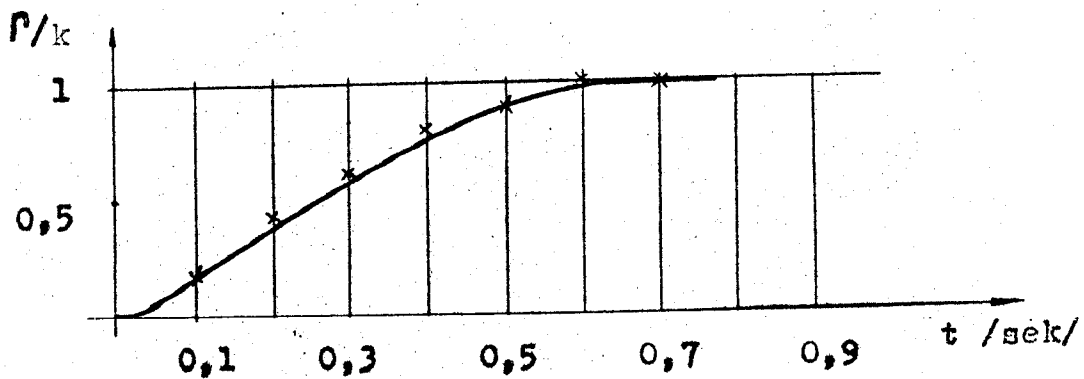




Sl.2. - a) Napon koji označava početak uzbude
b) Odzivna funkcija momenta na impulsnu uzbudu



Sl.3. - Kvalitativni tok kemijske reakcije
(x - količina produkta)



Sl.4. - Odzivna funkcija momenta na impulsnu uzbudu
(— mjerena krivulja, * računске vrijednosti
funkcije $w(t)/k$)