

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

Dinamikai instabilitások elektrokémiai rendszerekben

Nagy Timea

Témavezető: Dr. Gáspár Vilmos egyetemi tanár



DEBRECENI EGYETEM

Kémiai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2015

I. AZ ÉRTEKEZÉS ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEI

Az elektrokémiai cellákban gyakran alakulnak ki olyan instabilitások, amelyek áram-, vagy feszültségoscillációt eredményezhetnek. Ezek a periodikus jelenségek gyakran megfigyelhetők például egyes fémek anódos oldódásakor galvanosztatisz vagy potenciosztatisz körülmények között. Az ilyen rendszerekben egyidejűleg lejátszódó nemlineáris kémiai reakciók és fizikai folyamatok kölcsönhatásaként általában csak sok dinamikai változóval leírható, olyan komplex jelenségek alakulhatnak ki, mint például a bistabilitás, a periodikus vagy a kaotikus oscillációk.

Célunk a *réz-ortofoszforsav elektrokémiai rendszerben* kialakuló dinamikai instabilitások következményeként megfigyelhető nemlineáris dinamikai jelenségek, és ezek általánosítható törvényszerűségeinek megismerése és tanulmányozása volt. Ez a célkitűzés több szempontból is fontos. Egyrészt az ipari folyamatokban általában elkerülendők a dinamikai instabilitások, tehát szükséges az eredetük törvényszerűségeinek megismerése, másrészt pedig az eredmények jelentősek lehetnek az olyan alapkutatásokkal kapcsolatban is, mint például az idegrendszer működésének megismerését célzó nemlineáris dinamikai vizsgálatok. Célszerűnek tartottuk azt is tanulmányozni, hogy különböző paraméterek hogyan befolyásolják az oszcilláló elektrokémiai rendszer dinamikáját (periódusidő, hullámforma stb.). Ilyen szabályozó paraméterek lehetnek például az elektrolit koncentrációja és hőmérséklete, a munkaelektrod felületének borítottsága, a korongelektrod forgási sebessége vagy a cellával sorbakötött, külső ellenállás nagysága. A potenciosztatisz körülmények között végzett kísérleteinkben az egyik legfontosabb kontrollparaméter a cellára kapcsolt feszültség volt, a rendszer dinamikáját jól jellemző és könnyen mérhető állapotjelző pedig az elektródon átfolyó áram volt.

Vizsgálatainkat három, jól elkülöníthető témakörben végeztük.

Az *első témakörben* a diplomamunkámban már korábban (2009) is tanulmányozott birtimicitás (másként, dinamikai bistabilitás) további, részletes kísérleti vizsgálatát és a jelenség elméletének, illetve modellszintű értelmezésének kidolgozását tűztük ki célul. A témakör fontosságát jól mutatja, hogy az élő szervezetek harmonikus működése is tulajdonképpen különböző komplex, de megfelelően összehangolt, ritmikus folyamatok eredménye.

A *második témakörben* a kutatócsoportunk forgó korongelektrodokkal végzett korábbi kísérletei során felmerült egyik érdekes és fontos kérdésre kerestük a választ, nevezetesen arra, hogy milyen hatással van az elektrod forgási sebessége az áramoscilláció periódusidejére és hullámalakjára. Meglepő módon, annak ellenére, hogy forgókorong elektródot régóta és sokan alkalmaztak oszcilláló elektrokémiai rendszerek vizsgálatára, a szakirodalomban nem találtunk utalást a forgási sebesség hatásának tanulmányozására. Ezért a célul kitűzött kutatásunk nem csak újszerű, de egyben hiánypótló is. Az eredmények értelmezéséhez nagy segítséget jelentett az ún. nullklínatechnika alkalmazása, melynek részleteit kutatásaink harmadik témakörében dolgoztuk ki.

A *nullklína* egy olyan speciális függvénykapcsolatot jelent egy dinamikai rendszer változói között, amelyben az egyiknek az értéke időben állandó (a változási sebessége nulla). A változók fázisterében található nullklínákat ezidáig még senkinek sem sikerült kísérletesen meghatározni. Célunk volt olyan kontroll eljárások kidolgozása, amelyekkel a vizsgált rendszert a kiválasztott nullklínához tudjuk terelni, és azon tudjuk tartani. Ilyen módon lehetővé válna, hogy a nullklínák segítségével egy rendszer dinamikáját anélkül rekonstruálhassuk, hogy ismernénk az azt meghatározó és leíró, általában sokváltozós differenciálegyenlet-rendszert.

II. ALKALMAZOTT VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A felhasznált modell, a mérőrendszer és az alkalmazott módszerek

1. Koper–Gaspard háromváltozós általános elektrokémiai modell

A fémek elektrokémiai, anódos oldódására vonatkozó általános modellt Koper és Gaspard dolgozták ki (Koper, 1992). A modell dimenziómentes formája a következőképpen fejezhető ki, a réz-ortofoszforsav elektrokémiai rendszerre:

$$C_d \frac{de}{dt} = \frac{V - e}{R} - 120k(e)u, \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = -1,25d^{1/2}k(e)u + 2d(w - u), \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = 1,6d(2 - 3w + u), \quad (3)$$

ahol C_d az elektród felületegységre vonatkoztatott kettősréteg-kapacitása, e az elektródpotenciál, R a cella teljes soros ellenállása, V a cellapotenciál, amit a potenciosztással tartunk állandó értéken, d a korongelektród forgási sebessége, u és w ugyanannak az elektroaktív részecskének a dimenziómentes koncentrációja az elektródhoz közelebb ill. távolabb eső diffúziós rétegben és a $k(e)$ a heterogén elektronátlépési reakcióban a kettősréteg potenciáltól komplex módon függő dimenziómentes sebességi állandó, amely:

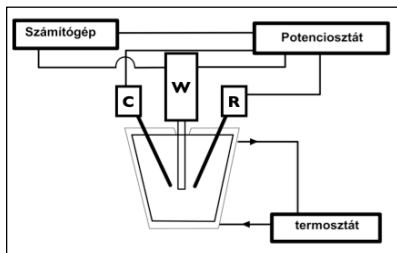
$$k(e) = 2,5\Theta^2 + 0,01 \exp[0,5(e - 30)], \quad (4)$$

ahol Θ az elektród elektroaktív részecskék általi felületi borítottsága, melynek változása az elektródpotenciál függvényében a következőképpen adható meg:

$$\Theta = \begin{cases} 1 & \text{ha } e \leq 35 \\ \exp[-0,5(e - 35)^2] & \text{ha } e > 35 \end{cases}. \quad (5)$$

2. A mérőrendszer

A kísérleteket egy termosztálható, háromelektrodos elektrokémiai cellában végeztük el (1. ábra). Ebben ellenelektrodként (C) egy nagy felületű, henger alakú Pt-elektrodot (5 cm^2 , Radelkis OH-9437), és referenciaelektrodként (R) egy Hg/Hg₂SO₄/tel. K₂SO₄ (Radiometer Analytical, Ref.-621) vagy telített kalomel elektródot használtunk. Munkaelektrodként (W) egy 5 mm átmérőjű Cu (99,99%+) forgó korongelektródot (Radiometer EDI 101) alkalmaztunk. Az elektrokémiai cellát $-5 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ -on termosztáltuk Lauda RM6B termosztát segítségével. A cellába elektrolitoldatként pontosan 70 cm^3 ortofoszforsavat (85 % Spektrum-3D) mértünk be. A rézelektrodot minden alkalommal egy kétlépéses eljárással készítettük elő a kísérletekre. A fém felületét először csiszolópapír sorozat alkalmazásával tisztítottuk és políroztuk.



1. ábra A háromelektrodos elektrokémia cella vázlatos rajza.

Az elektrokémiai cellára kapcsolt feszültséget egy Elektroflex-EF451 típusú számítógépvezérelt potenciosztással szabályoztuk, és mértük a munkaelektrodon átfolyó áram

erősségét. Az adatgyűjtés frekvenciája 200 Hz volt. A korongelektród forgási sebességét 12-bit felbontású D/A konverterrel vezéreltük (Labcard PCL-818L).

A kísérletek reprodukálhatósága érdekében a rézelektródot anódosan políroztuk 500 mV feszültségen 2 percen keresztül. Ekkor elkezdődött a réz anódos oldódása és a réz felületén levő oxidréteg leoldódott. Ezt követően felvettük a rézelektród polarizációs görbét. Az oldat soros ellenállása általában 70 ± 5 Ohm volt, melyet kísérletről kísérletre megmértünk. Közvetlenül a kísérletek előtt a rendszert 1-2 órán keresztül a $V_H + 10$ mV feszültségértéken tartottuk (ahol V_H a Hopf-féle bifurkációs pontban mért potenciál értéke). Ezen időtartam alatt az oszcillációk stabilizálódtak, s így a kísérletek reprodukálhatók voltak. Ismert, hogy a réz-ortofoszforsav elektrokémiai rendszer dinamikáját az oxigén levegőből történő beoldódása nem befolyásolja, ezért külön oxigénmentesítést nem végeztünk.

3. Késleltett visszacsatolás

A késleltetett visszacsatolással történő szabályozáshoz a cellapotenciált a következő összefüggés szerint perturbáljuk:

$$\delta V(t) = K [E(t) - E(t - \tau)], \quad (6)$$

ahol $\delta V(t)$ a feszültségperturbáció, K a visszacsatolási állandó, $E(t)$ és $E(t - \tau)$ az elektródpotenciál t illetve $(t - \tau)$ időpontbeli értéke, ahol τ a késleltetési idő.

4. Numerikus módszerek

A differenciálegyenlet-rendszereket az XPP programmal integráltam. A Gear algoritmust használtam, aminek az abszolút hibahatára 10^{-6} , a nullklínák számolásához pedig a negyedrendű Runge-Kutta módszert választottam.

III. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Multiritmiticitást mutattunk ki a réz-ortofoszforsav elektrokémiai rendszerben

1.1. Biritmiticitást mutattunk ki a réz-ortofoszforsav elektrokémiai rendszerben késleltetett visszacsatolás alkalmazásával (2. ábra).

A biritmiticitás azt jelenti, hogy azonos körülmények között kétféle, eltérő periódusidővel oszcilláló dinamikai állapot is kialakulhat a rendszer előéletétől függően. Esetünkben ez az áram eltérő periódusidővel történő oszcillációját jelenti az egyébként teljesen azonos paraméterek mellett, beleértve a visszacsatolási állandó és a késleltetési idő értékét is.

1.2. Megállapítottuk, hogy a biritmiticitás annál a késleltetési idő értéknél alakul ki, ahol a hiszterézishurok először jelenik meg (2. ábra).

1.3. Igazoltuk, hogy a biritmiticitás tartománya szélesedik a késleltetési idő növelésével (2. ábra).

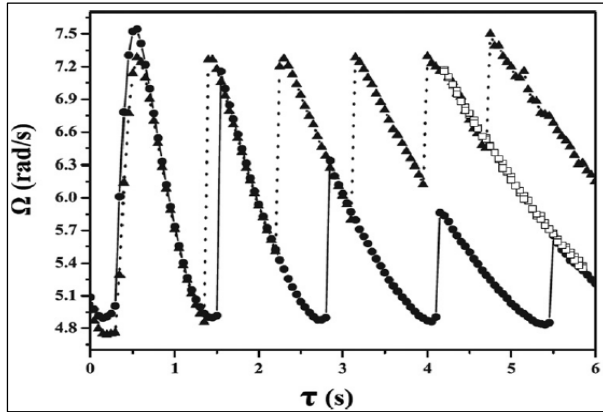
1.4. Megállapítottuk, hogy minél nagyobb a szabályozási együttható értéke, annál kisebb késleltetési időnél jelenik meg a biritmiticitás (3. ábra).

A szabályozási együttható és a kritikus késleltetési idő szorzata közel állandó.

$$\kappa \tau_{crit} \approx 1 \quad (7)$$

1.5. Triritmitást mutattunk ki nagy késleltetési idő alkalmazásával (2. ábra).

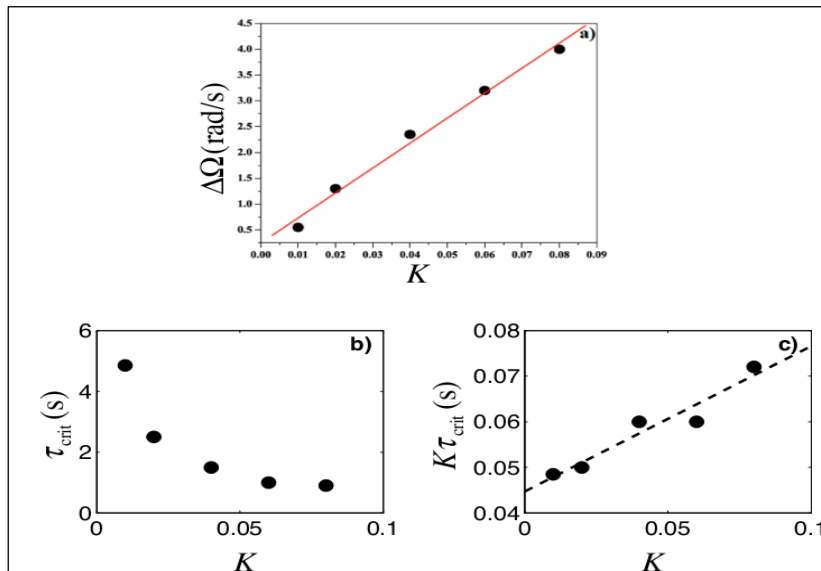
A triritmitás azt jelenti, hogy teljesen azonos körülmények között, beleértve a visszacsatolási állandó és a késleltetési idő értékét is, háromféle, eltérő periódusidővel (körfrekvenciával) oszcilláló dinamikai állapot is kialakulhat a rendszer előéletétől függően.



2. ábra Kísérlet: A biritmitás és a triritmitás: az oszcilláció körfrekvenciájának változása ($\Omega/\text{rad/s}$) a késleltetési idő (τ/s) függvényében 0 s-tól 6 s-ig (\bullet) és 6 s-tól 0 s-ig (\blacktriangle). A triritmitás tartománya a $\tau = 4,2$ s - 5,8 s értékek közötti szakasz, melyben a rendszert perturbálva megkapjuk a négyzettel (\square) jelölt pontokat. ($V_H = 120$ mV, $V_o = 130$ mV, $R = 87$ Ohm, $T_0 = 1,24$ s.)

1.6. Az oszcilláció ún. fázismodellje alapján megjósoltuk, majd kísérletekkel igazoltuk, hogy gyenge visszacsatolás esetén a körfrekvenciák maximális és minimális értékeinek különbsége egyenes arányosság szerint változik a visszacsatolási állandó értékével. (3. ábra).

$$\Delta\Omega = \Omega_{\max} - \Omega_{\min} = 2\kappa = 2\beta K \quad (8)$$



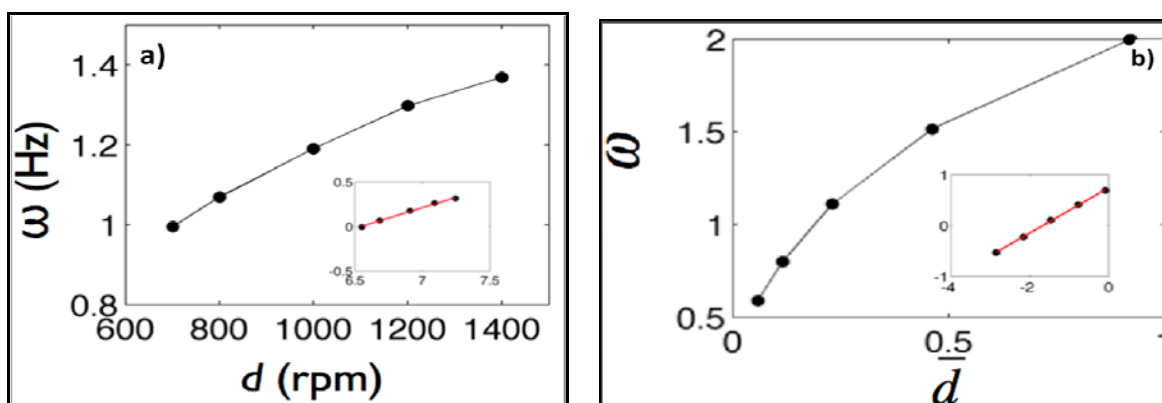
3. ábra Kísérlet: $\Delta\Omega$, K és τ_{crit} kapcsolata gyenge visszacsatolás esetében. a) A $\Delta\Omega = \Omega_{\max} - \Omega_{\min}$ értéke a K állandó függvényében. Az illesztett egyenes meredeksége $2\beta = 48,38$ rad/s. b) A kritikus késleltetési idő értéke (τ_{crit}) K függvényében, c) A $K\tau_{\text{crit}}$ szorzat értéke K függvényében.

2. Új összefüggéseket találtunk az elektrokémiai oszcilláció frekvenciájának és hullámformájának a korongelektród forgási sebességétől való függésének leírására

A kísérleteket úgy célszerű elvégezni, hogy amikor a forgási sebességet változtatjuk, akkor a cella teljes ellenállását (R) úgy módosítjuk, hogy a bifurkációs pont – jó közelítéssel – mindig ugyanannál az e_H (Hopf-potenciál) értéknél legyen.

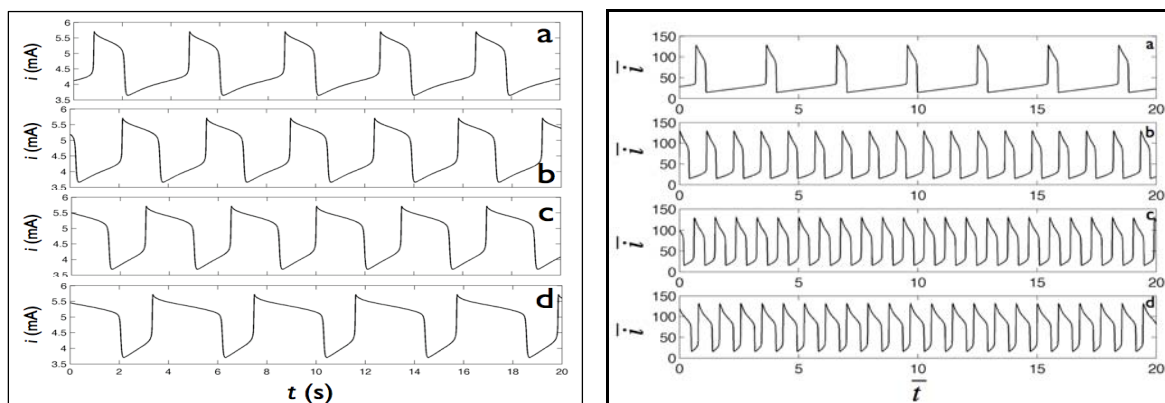
2.1. Modellszámításokkal megjósoltuk, majd kísérletekkel bizonyítottuk, hogy az oszcilláció ω frekvenciája négyzetgyökösen függ a korongelektród d forgási sebességétől (4. ábra):

$$\omega \propto d^{1/2} \quad (9)$$



4. ábra A forgási sebesség (d) hatása az oszcilláció frekvenciájára (ω) a Hopf-féle bifurkációs pont közelében. A belső kis ábrák a főábrákban szereplő adatok alapján készített ln-ln típusú ábrák. Az illetett egyenesek (piros szakaszok) meredekségei: a) 0,59, b) 0,45. (a): kísérlet, b): modellszámítás)

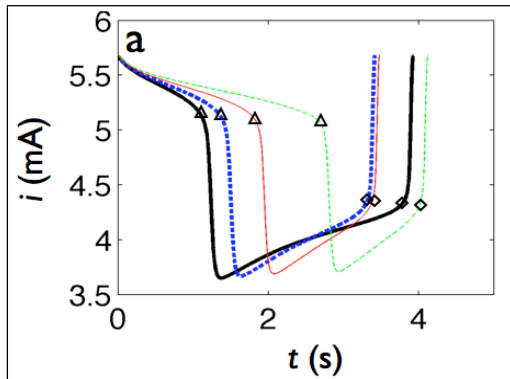
2.2. Megállapítottuk, hogy a forgási sebesség közvetlenül hatással van az elektrokémiai oszcilláció frekvenciájára és alakjára (5. ábra)



5. ábra A relaxációs típusú áramoszcilláció hullámalkjának változása a forgási sebesség függvényében. Bal oldali ábra (kísérlet) a)–d): $d = 1300, 1400, 1500, 1600$ rpm. Jobb oldali ábra (modellszámítás) a)–d): $\bar{d} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$.

2.3. Megállapítottuk, hogy habár a forgási sebesség változtatásának hatására az oszcilláció hullámalakja jelentősen megváltozik, ennek ellenére a hullámforma jellegzetes pontjainak (maximum, minimum és az átmeneti pontok) helyzete nem függ a forgási sebességtől (5. és 6. ábra).

2.4. A nullklínák segítségével értelmeztük a relaxációs oszcillációk jellegzetes hullámalakját és a karakterisztikus pontjaik állandóságát (6. ábra).



6. ábra Kísérlet: A relaxációs oszcilláció jellegzetes tulajdonságainak változása a forgási sebesség növelésével. Oszcillációs hullámformák különböző forgási sebességeknél. Fekete folytonos vonal: $d = 1300$ rpm; kék pontozott vonal: $d = 1400$ rpm; piros folytonos vonal: $d = 1500$ rpm; zöld pontozott vonal $d = 1600$ rpm. A háromszög és a rombusz a felső és alsó átmeneti pontokat jelöli.

3. Modellfüggetlen módszert dolgoztunk ki az elektrokémiai rendszerek dinamikai viselkedésének jellemzésére a nullklínák segítségével

A nullklína egy olyan speciális függvénykapcsolatot jelent egy dinamikai rendszer esszenciális változói között, amelyben az egyik változó értéke időben állandó (változásának sebessége nulla).

3.1. Kidolgoztuk az adaptív szabályozás formuláját az e -nullklína pontjainak meghatározására, amely a következő:

$$V = V_0 + L(b - e), \quad (10)$$

$$\frac{db}{dt} = \lambda(b - e), \quad (11)$$

ahol V a cellapotenciál, V_0 a cellapotenciál azon rögzített értéke, amelynél a nullklína pontjait számolni kívánjuk, L az adaptív eljárás szabályozási együtthatója, b egy külső dinamikai változó, λ pedig egy olyan kontroll paraméter, amely meghatározza azt az időskálát (sebességet), amellyel a b értéke az e értékét „követi”.

Amikor a szabályozás sikeres, akkor $b \equiv e$, és további perturbáció nem történik (a cellapotenciál állandó és azonos a kívánt V_0 értékkel). Ekkor az e állandósult értéke megadja a nullklína egy pontjának egyik koordinátáját az u vs. e fázistérben (7. ábra).

3.2. Kidolgoztuk a PD-kontroll formuláját, amelyet az e -nullklína egy pontjának adaptív kontrollal történő meghatározásakor egyidejűleg alkalmaztunk az u változó szabályozására (7. ábra).

Az e -nullklína pontjának másik koordinátáját az u változóra egyidejűleg alkalmazott PD-eljárással tudjuk megtartani egy kívánt u_0 értéken vagy stabilizálni egy, a rendszer dinamikája által megszabott u értéken. Az u értékének szabályozására a forgási sebesség (d) bizonyult a legalkalmasabb paraméternek:

$$d = d_0 + \alpha(u - u_0) + \beta \frac{du}{dt}, \quad (12)$$

A (12) egyenletben d_0 a forgási sebesség azon rögzített értéke, amelynél a nullklína pontjait számolni kívánjuk, az α és a β a proporcionális és a differenciális szabályozási eljárás együtthatói. Amennyiben a szabályozás sikeres, akkor d értéke, s ezzel együtt az u értéke is állandósul, s ez megadja az e -nullklína adott e értékhez tartozó pontjának másik koordinátáját az u vs. e fázistérben (7. ábra).

3.3. *Kidolgoztuk az adaptív kontroll formuláját az u -nullklína pontjainak meghatározására, amely a következő:*

$$d = d_0 + L(b - u), \quad (13)$$

$$\frac{db}{dt} = \lambda(b - u), \quad (14)$$

ahol d_0 a forgási sebesség azon rögzített értéke, amelynél a nullklína pontjait számolni kívánjuk, L az adaptív eljárás szabályozási együtthatója, b egy külső dinamikai változó, λ pedig egy olyan kontroll paraméter, amely meghatározza azt az időskálát (sebességet), amellyel a b értéke az u értékét „követi”. Amennyiben a szabályozás sikeres, akkor $b \equiv u$, és további perturbáció nem történik (a forgási sebesség állandó és azonos a kívánt d_0 értékkel). Ekkor az u állandósult értéke megadja a nullklína egy pontjának egyik koordinátáját az u vs. e fázistérben (7. ábra).

3.4. *Kidolgoztuk a PD-kontroll formuláját, melyet az u -nullklína egy pontjának adaptív kontrollal történő meghatározásakor egyidejűleg alkalmaztunk az e változó szabályozására (7. ábra).*

Az u -nullklína pontjának másik koordinátáját az e változóra egyidejűleg alkalmazott PD-eljárással tudjuk megtartani egy kívánt e_0 értéken vagy stabilizálni egy, a rendszer dinamikája által megszabott e értéken. Az e értékének szabályozására a cellapotenciál (V) a legalkalmasabb paraméter:

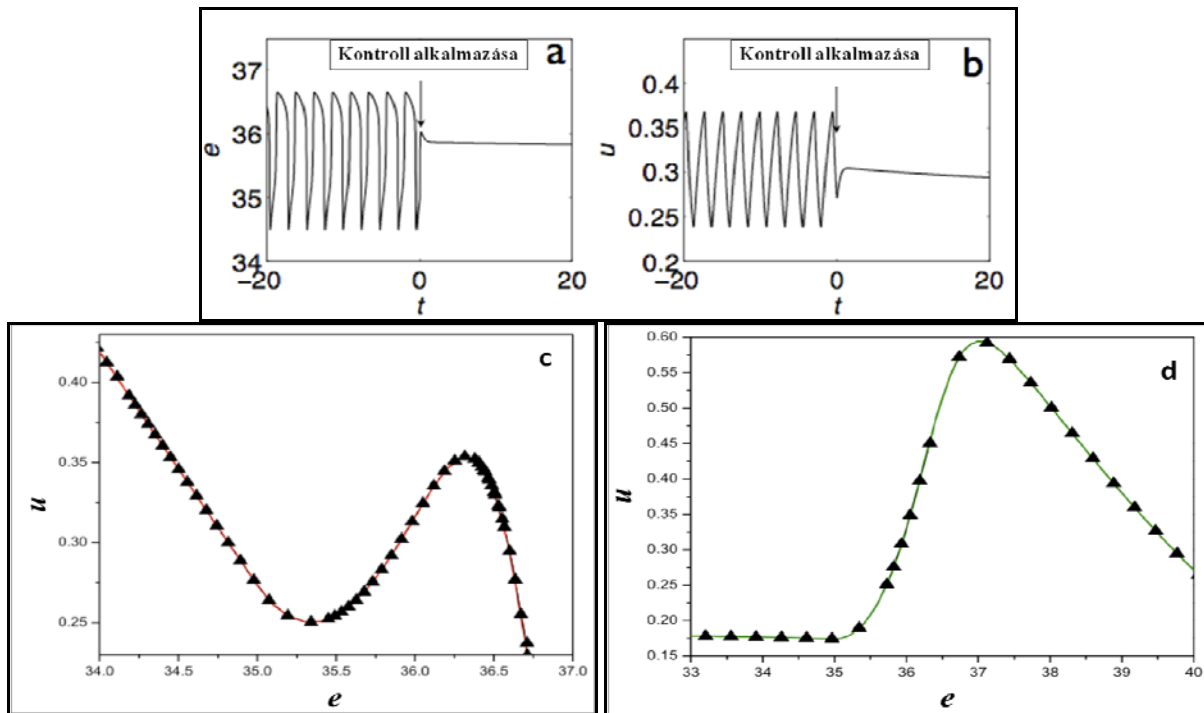
$$V = V_0 + \alpha(e - e_0) + \beta \frac{de}{dt}, \quad (15)$$

ahol V_0 a cellapotenciál azon rögzített értéke, amelynél a nullklína pontjait számolni kívánjuk, az α és a β a proporcionális és a differenciális szabályozási eljárás együtthatói. Amennyiben a szabályozás sikeres, akkor V értéke, s ezzel együtt az e értéke is állandósul, s ez megadja az u -nullklína adott u értékhez tartozó pontjának másik koordinátáját az u vs. e fázistérben (7. ábra).

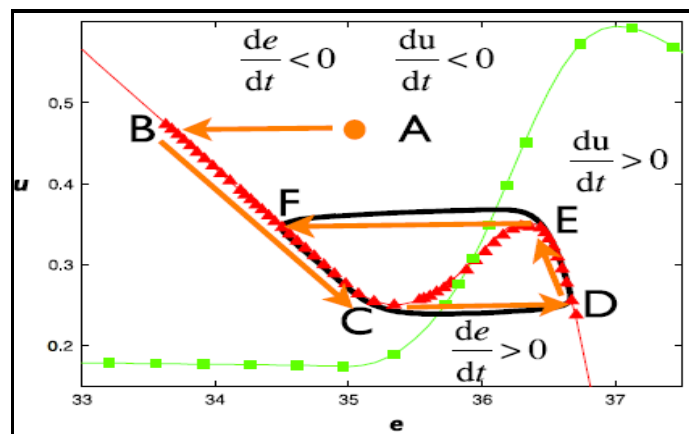
3.5. *Megállapítottuk, hogy a nullklínatechnika felhasználható a rendszer dinamikájának rekonstrukciójára (8. ábra).*

A vektortér elemzésével megállapíthatjuk, melyek a nullklínák gyorsabb és a lassabb szakaszai, s ezek az ismeretek felhasználhatók az oszcilláció dinamikájának kvalitatív és kvantitatív jellemzésére.

3.6. *Kidolgoztuk és alkalmaztuk az alkalmas kontroll formulákat az e -, és az u -nullklína pontjainak meghatározására a bifurkációs diagram bistabilis és gerjeszthetőségi tartományaira is.*



7. ábra Modellszámítás. Az oszcilláció megszüntetése a megfelelő kontroll eljárások kombinált alkalmazásával. a) és b): az e ill. u értékek idősrát mutatják a kontroll eljárások egyidejű bekapcsolása ($t = 0$) előtt és után. a) és c): a piros színű vonallal jelzett görbe az analitikus megoldást mutatja, melyekre jól illeszkednek a numerikus módszerrel meghatározott pontok (\blacktriangle). Az e változóra adaptív kontrollt alkalmaztunk. b) és d): A zöld színű vonallal jelzett görbe az analitikus megoldást mutatja, melyekre jól illeszkednek a numerikus módszerrel meghatározott pontok (\blacktriangle). Az u változóra PD-kontrollt alkalmaztunk.



8. ábra Modellszámítás. A nullklínák analízise az u vs. e fázistérben az oszcilláció tartományában. A piros színű, vékony vonallal jelzett görbe az e -nullklínát, a zöld színű, vékony vonallal jelölt görbe pedig az u -nullklínát mutatja. A piros háromszögek az e -nullklína, a zöld négyzetek pedig az u -nullklína meghatározott pontjait jelölik. A fekete színű vastag vonallal rajzolt görbe a a Koper-Gaspard kétváltozós modell numerikus integrálásával számított oszcillációnak megfelelő határciklus. A narancssárga nyilak a fázistér egy kiválasztott pontjának mozgását mutatják a fázistér A és F pontjai között.

IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Az elektrokémiai cellák széles körben alkalmazott és intenzíven tanulmányozott példái az egyensúlytól távol tartott dinamikai rendszereknek. Az elektrokémiai folyamatok sebességét befolyásoló paraméterek általában könnyen és nagy pontossággal változtathatók, s ez teszi lehetővé a cellák instabilitása miatt kialakuló különböző nemlineáris dinamikai jelenségek, és az azokat leíró, általánosítható fizikai-kémiai törvényszerűségek megismerését és tanulmányozását. A három témakörben megismert és komplex módon, kísérletesen és modellszámításokkal egyaránt vizsgált, részben új nemlineáris jelenségek, valamint az értelmezésük újszerűsége is hasznos és jól megalapozott kiindulópontot jelenthetnek az elektrokémiai rendszereken túli, különösen az élő szervezettel összefüggő határtudományi területeken, például az idegimpulzusok terjedésének vagy az izommozgások működésének megértését célzó kutatásokban.

A késleltetett visszacsatolás hatására kialakuló bi- ill. multiritmicitás vizsgálatával nyert eredményeink segítséget jelenthetnek például a különböző időskálájú, periodikusan funkcionáló biológiai alrendszerek összekapcsolásával (pl. a cardio-respiratory rendszerben) kialakuló ún. „belső” késleltetett visszacsatolás hatásának megértésében, a komplex dinamika jellemzésében, illetve vészhelyzetben annak életmentő szabályozásában, vezérlésében.

A multiritmicitás felismerése segítséget jelenthet az olyan az adaptív biológiai rendszerek tulajdonságainak feltárásában, mint amilyen például az emberi hallás.

Az elektród forgási sebességének változtatásával tulajdonképpen az elektród felülete és az oldat belseje közötti anyagtranszport sebességét szabályoztuk, s igazoltuk, hogy ilyen effektusok hatására megváltozhat az oszcilláció frekvenciája és hullámalakja. Hasonló hatása lehet az anyagtranszfer szabályozásának biológiai oszcillátorok esetében is, ami a biológiai folyamatok vezérlésének a lehetőségét teremti meg a modern tudomány számára.

Kísérleteinkkel igazoltuk, hogy a nullkínák ismeretében az oszcilláló, a bistabilis és a gerjeszthető rendszer dinamikája is reprodukálható, anélkül, hogy pontosan ismernénk a rendszer viselkedését leíró függvényeket. A nullkínatechnika jelentősége abban is megmutatkozik, hogy a módszer kiterjesztése magasabb dimenziójú rendszerek dinamikai jellemzésére a témakörrel foglalkozó kutatók egyik legfontosabb jövőbeli célja. Ez az indirekt, egyszerű kísérleti módszer pontos információt adhat a bonyolultabb biológiai rendszerekről, és felhasználható a trajektóriák rekonstrukciójára is.

A tisztán alap kutatásnak tekintett kísérleteink eredményei akkor érnék el igazi céljukat, ha azokat használhatónak ítélnék a nemlineáris dinamika témakörében vagy annak határterületein dolgozó hazai és külföldi kutatók.

V. TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK

Az értekezés témakörében megjelent

T. Nagy, E. Verner, V. Gáspár, H. Kori, I. Z. Kiss
Delayed-Feedback Induced Multirhythmicity in the Oscillatory Electrodeposition of Copper

Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science
Volume 25, Issue 6, 064608: 1-8. doi:10.1063/1.4921694

2015

Impakt faktor: 1,954 (2014)

M. J. Hankins, T. Nagy, I. Z. Kiss
Methodology for Nullcline-based Model from Direct Experiments: Applications to Electrochemical Reaction Models

Computers and Mathematics with Applications
Volume 65, Issue 10, 1633-1644. doi: 10.1016/j.camwa.2012.11.016

2013

Impakt faktor: 1,996 (2015)

M. Úrvölgyi, V. Gáspár, T. Nagy, I. Z. Kiss
Quantitative Dynamical Relationships for the Effect of Rotation Rate on Frequency and Waveform of Electrochemical Oscillations

Chemical Engineering Science
Volume 83, 56-65. doi:10.1016/j.ces.2011.10.073

2012

Impakt faktor: 2,386 (2015)

I. Z. Kiss, T. Nagy, V. Gáspár
Dynamical Instabilities in Electrochemical Processes
Solid State Electrochemistry I: Electrodes, Interfaces and Ceramic Membranes, Ed. Vladislav V. Kharton, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany

Volume 2, 125-178. ISBN: 978-3-527-32638-9

2011

Előadások, poszterek az értekezés témakörében

T. Nagy, E. Verner, V. Gáspár, H. Kori, I. Z. Kiss

Delayed-Feedback Induced Multirhythmicity in the Oscillatory Electrodeposition of Copper

MTA Reakciókinetikai és Fotokémiai Munkabizottsági Ülés,
Siófok, Magyarország, 2014/05

M. Úrvölgyi, V. Gáspár, T. Nagy, I. Z. Kiss

Quantitative Dynamical Relationships for the Effect of Rotation Rate on Frequency and Waveform of Electrochemical Oscillations

4th European Science Foundation Conference on Functional Dynamics,
Prága, Csehország, 2011/09 (Poster No. P21)

T. Nagy, V. Gáspár, H. Kori, I. Z. Kiss

Delayed-Feedback Induced Multirhythmicity in the Oscillatory Electrodeposition of Copper

Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems
Gordon Research Conference,
Lucca (Barga), Olaszország, 2010/07 (off the record)



DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



Nyilvántartási szám: DEENK/186/2015.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Nagy Timea
Neptun kód: W9VXUD
Doktori Iskola: Kémiai Tudományok Doktori Iskola

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészlet(ek) (1)

1. Kiss, I.Z., **Nagy, T.**, Gáspár, V.: Dynamical Instabilities in Electrochemical Processes.
In: Solid State Electrochemistry II. : Electrodes, Interfaces and Ceramic Membranes. Ed.:
Vladislav V. Kharton, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 125-178, 2011. ISBN:
9783527326389

Idegen nyelvű tudományos közlemény(ek) külföldi folyóiratban (3)

2. **Nagy, T.**, Verner, E., Gáspár, V., Kori, H., Kiss, I.Z.: Delayed feedback induced multirhythmicity in the oscillatory electro-dissolution of copper.
Chaos. 25 (6), 064608-1-8, 2015. ISSN: 1054-1500.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4921694>
IF:1.954 (2014)
3. Hankins, M.J., **Nagy, T.**, Kiss, I.Z.: Methodology for a nullcline-based model from direct experiments: Applications to electrochemical reaction models.
Comput. Math. Appl. 65 (10), 1633-1644, 2013. ISSN: 0898-1221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2012.11.016>
IF:1.996





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



4. Urvölgyi, M., Gáspár, V., **Nagy, T.**, Kiss, I.Z.: Quantitative dynamical relationships for the effect of rotation rate on frequency and waveform of electrochemical oscillations.
Chem. Eng. Sci. 83, 56-65, 2012. ISSN: 0009-2509.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.073>
IF:2.386

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 6,336

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 6,336

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2015.09.11.

