



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО

КАТЕДРА „АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВОТО”

ЛИ ЧОНГ

**МАТЕМАТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ, УПРАВЛЕНИЕ И
ДИАГНОСТИКА НА МИКРОБНИ ГОРИВНИ КЛЕТКИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
по научна специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика
(Автоматизация производството)

Научни ръководители: проф. д-р инж. Коста Бошнаков
 проф. д-р инж. Липинг Фан

Научно жури: 1.проф. д-р инж. Стоян Стоянов- председател, рецензент
 2.доц. д-р инж. Иван Симеонов - рецензент
 3.проф. д-р инж. Андон Топалов
 4.проф. д-р инж. Коста Бошнаков
 5.доц. д-р инж. Любка Дуковска

София, 2017

Дисертационният труд е написан на 225 страници, съдържа 97 фигури и 12 таблици. Цитирани са 123 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен научен съвет на научното звено на катедра „Автоматизация на производството”, състояло се на 16.05.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 3 юли 2017 от 9:00 часа в зала 210, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувашите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

УВОД

Пречистването на отпадъчни води по използваните в момента в световен мащаб технологични схеми, консумира значително количество енергия и е източник на замърсители за околната среда. По време на пречистването на отпадъчните води в околната среда се отделят парникови газове и се генерират големи количества излишна активна утайка, разполагането на която е свързано с разходи за транспорт, енергия и труд.

По експертни оценки битовите отпадъчни води съдържат около 9.3 пъти повече енергия отколкото е необходима за пречистването им в съвременните пречиствателни станции. Това е причината за провеждане на широкомащабни научни изследвания за разработване на технологии, позволяващи генериране на енергия в процеса на пречистване. Прилаганите понастоящем технологии в индустриални условия за генериране на енергия в процеса на пречистване на отпадъчните води са анаеробното разграждане и възстановяването на топлина.

Едно перспективно направление за генериране на електрическа енергия в процеса на пречистване на отпадъчни води, но все още на етап научни изследвания в лабораторни или в полупромишлени условия е използването за целта на микробните горивни клетки (MFC). Те могат да генерират електричество от почти всички биоразградими органични замърсители, намиращи се в отпадъчните води.

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследването на микробни горивни клетки, предназначени за пречистване на отпадъчни води и едновременно генериране на електрическо напрежение. Предмет на провежданите изследвания са двукамерни микробни горивни клетки. Изследва се влиянието на режимните параметри върху ефективността на клетките, разработват се симулационни схеми на математичните модели, описващи поведението на клетките, разработват се и се изследват интелигентни системи за управление на клетките, системи за моделно предсказващо управление и системи, работещи в on-line режим за откриване на повреди и диагностика на микробните горивни клетки.

Глава 1 Математично моделиране и управление на микробни горивни клетки

1.1. Приложение на горивните клетки като възобновяеми енергийни източници и перспективи

В съвременния енергозависим свят енергийните източници са жизненоважен фундамент за развитието на човечеството. Конвенционалните източници на енергия, а именно нефтът, природният газ и въглищата, са основните ресурси за производство на електроенергия, но за съжаление запасите от тях се изчерпват със значително темпо. От друга страна влошаващото се качество на водата, произтичащо от индустриализацията, поставя големи предизвикателства пред пречистването на отпадъчните води.

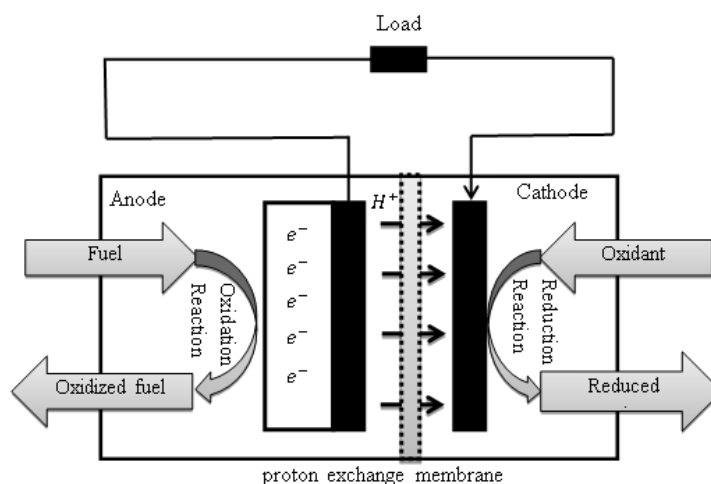
Микробните горивни клетки могат да предоставят уникална възможност за генериране на електрическа енергия от възобновяеми енергийни източници, като същевременно пречистват отпадъчните води. Голямото предимство на микробната горивна клетка е способността ѝ да извлича електричество от по принцип безполезни източници, като например органичното вещество в отпадъчните води.

Постигането на успехи в оптимизирането на конструкциите и режимите на микробните горивни клетки, както и разработването на модерни системи за управлението и диагностиката им ще доведе до повишаване на ефективността микробните горивни клетки и от своя страна до нарастване на използването на възобновяеми енергийни

източници, което от своя страна ще има положително въздействие за съхраняване на енергийните източници и положителен ефект върху околната среда.

1.2. Устройство, принцип на работа и характеристики на микробните горивни клетки

На Фиг.1.5 е показана схемата на H-образна двукамерна микробна горивна клетка



Фиг.1.5 Двукамерна микробна горивна клетка

Типичните микробни горивни клетки се състоят от две отделни камери – анодна и катодна. В анодната камера се поддържат анаеробни или аноксик условия, докато в катодната камера се създават аеробни условия. Между двете камери е разположена протонно-обменна мембрана. В анодната камера екзоелектрогенните микроорганизми консумират органичната материя и генерират протон H^+ и електрон e^- в анаеробна среда. Протоните минават през протонно-обменна мембрана към катодната камера, докато електроните достигат до катодната камера през външна електрическа верига. В катодната камера терминалният акцептор на електрони, включващ кислород, нитрат и сулфат, приема електроните и се комбинира с протони за получаване на нови редуцирани продукти. По този начин електрическата енергия се произвежда на основата на трансформация на химическата енергия.

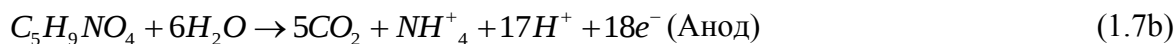
Като илюстрация, са представени анодни реакции на ацетата и сместа от глюкоза и глутаминова киселина за моделиране на микробни горивни клетки в следните случаи.

За случая с използването на ацетат като субстрат, ацетатът се окислява заедно с осем електронен трансфер на анода и след това електроните e^- се придвижват към катода, комбинирайки с кислород O_2 и вода H_2O , за да образуват хидроксилен йон OH^- . Реакциите могат да бъдат описани чрез следните уравнения:



За случаите, когато се използват смес от глюкоза и глутаминова киселина като субстрати, реакциите се разглеждат като две окислителни реакции на глюкоза и глутаминова киселина, които протичат в анодната камера. Глюкозата се окислява, и се генерират двадесет и четири електрона, а при глутаминовата киселина протича

окислителна реакция за освобождаване на осемнадесет електрона едновременно. Тогава електроните e^- имат подобно поведение като за случая на единичен субстрат. Те се придвижват към катода през външния контур. Реакциите могат да бъдат описани със следните изрази:



1.3. Математични модели на микробни горивни клетки

(I) Математичен модел на Моно

В анодната камера кривата на растежа на микроорганизмите и кинетиката на потребление на субстрата математически могат да бъдат описани с уравнението на Моно както следва:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{[S]}{K_{[S]} + [S]} \quad (1.10)$$

В зависимост от сложността на MFC, за системите, в които участват два и повече субстрата или за множество бактериални общности, кинетиката може да бъде описана с модифицираното уравнение на Моно както следва:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{[S_1]}{K_{[S_1]} + [S_1]} \frac{[S_2]}{K_{[S_2]} + [S_2]} \quad (1.11)$$

(II) Уравнение Nernst (Нернст)

За процеса на пренасяне на заряда, напрежението на микробната горивна клетка може да бъде описано от уравнението на Nernst, както следва:

$$E_{\text{thermo}} = -\frac{\Delta G^0}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\text{Продукт fugacity}}{\text{Реактант fugacity}} \right) \quad (1.13)$$

Концентрационните загуби могат да се изчислят от потенциалната разлика между напрежението при отворена верига и напрежението на клетката при високи стойности на тока. Така може да се използва уравнението на Nernst за концентрациите на реагентите в обема на течността и върху повърхността на електрода, както следва:

$$\Delta E = \eta_{\text{conc}} = \frac{RT}{mF} \ln \left(\frac{C_{\text{Bulk}}}{C_{\text{Surface}}} \right) \quad (1.14)$$

(III) Уравнение на Butler-Volmer

При ниски плътности на тока, електрохимичните реакционни енергийни бариери съществуват на интерфейса между електродите и електролита. Оттук, загубите от активиране са видими за преодоляване на енергийните бариери на електрохимичната реакция. Загубите от активиране на всеки електрод на MFC се описват от уравнението на Butler-Volmer както следва:

$$I_{\text{MFC}} = i_0 A_{\text{sur}} \left[\exp \left(\frac{\beta_1 m F \eta_{\text{act}}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-\beta_2 m F \eta_{\text{act}}}{RT} \right) \right] \quad (1.15)$$

Където β_1 и β_2 са съответно преносните коефициенти на редукция и окисление, които се определят от процесите на електронен пренос на интерфейса между електродите и електролитите.

Като полезен инструмент за теоретичните изследвания на микробната горивна клетка, математическият модел и симулирането на работата на клетката са необходими за оценка на динамичното поведение и за целите на оптимизация на режимите на работа на клетката.

Моделите на микробните горивни клетки се представят чрез обикновени диференциални уравнения, които за една входна x и една изходна променлива y в общ вид могат да бъдат представени със следния израз:

$$F(x, y, y', y'', y''', \dots, y^{(n-1)}, y^{(n)}) = 0 \quad (1.16)$$

Изходното напрежение V_{mfc} на единична микробна горивна клетка може да бъде определено по следния израз:

$$V_{mfc} = V^0 - \eta_a + \eta_c - \left(\frac{d_{mfc}}{k^{aq}} + \frac{d^m}{k^m} \right) i_{mfc} \quad (3.3)$$

Където V^0 е напрежението на отворена верига; d_{mfc} и d^m са разстоянието между електродите и дебелината на мембраната; k^{aq} и k^m са съответно проводимостта на разтвора и мембраната.

В уравнението (3.3) i_{mfc} е плътността на тока на единична микробна горивна клетка и може да бъде описана от следната връзка на плътността на тока на микробните горивни клетки и потока на йоните през мембраната:

$$i_{mfc} = F \sum_i z_i N_i \quad (3.4)$$

Където z_i е броят на зарядите на i -тия вид; N_i е повърхностният поток на i -тия вид; F е константата на Фарадей.

В уравнението (3.3), η_a и η_c са съответно свръх потенциалите на анода и катода и могат да бъдат изчислени, като се използват принципите на масовите баланси и баланса на заряда съответно в анодната и катодната камери.

1.4. Управление на микробни горивни клетки

Методите за управление на микробните горивни клетки са анализирани и класифицирани в две главни категории. Едната категория е управление на базата на модели, а другата голяма категория е управление на базата на данни.

1.5. Диагностика и предсказващо поддържане

Изследванията в областта диагностиката и предсказващото поддържане на микробни горивни клетки не са значителни. За откриването на повреди е от значение анализа на бавно протичащи реакционни процеси в микробната горивна клетка, които могат да доведат до значителна повреда и прекратяване на работата на клетката

Изводи към Глава 1

1. Микробните горивни клетки са перспективна алтернатива на възобновяемите енергийни източници

2.Основните недостатъци на микробните горивни клетки са ниското изходно напрежение и мощност. Подобряването на тези показатели главно се постига чрез конструктивни подобрения

3.На пазара не се предлагат симулационни модели на микробни горивни клетки

4.Микробните горивни клетки са динамични обекти за управление с променливи параметри

5.Възможностите за управление на разглежданите горивни клетки с използването на съвременни методи за управление, включително интелигентни методи за управление не са развити в достатъчна степен

6.Проблемите, свързани с откриване на повреди и изолирането им не са достатъчно изследвани

Главната цел на дисертационния труд е създаване и изследване на лабораторна микробна горивна клетка, създаване и изследване на симулационни модели, управляващи и диагностични системи за микробни горивни клетки за пречистване на отпадъчни води и генериране на електричество

За постигане на целта на дисертационния труд са поставени следните задачи:

1.Създаване на лабораторна микробна горивна клетка и система за измерване и събиране на данни за изследване на клетката

2.Експериментални изследвания на операционните режими на лабораторната микробна горивна клетка

3.Разработване на симулационен модел на микробна горивна клетка и статична оптимизация на въпросната горивна клетка

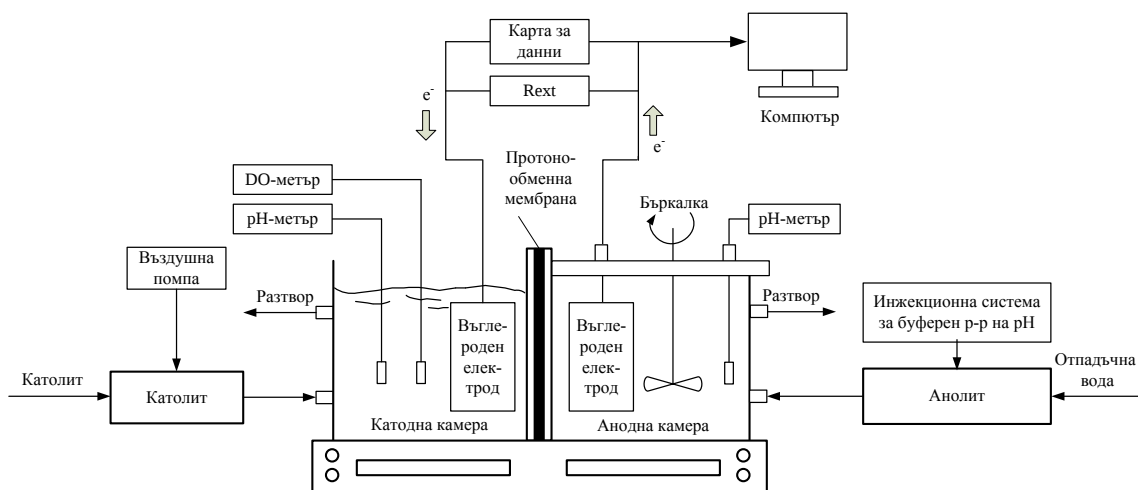
4.Разработване на управляващи системи за микробни горивни клетки, основаващи се на размита логика и моделно предсказващо управление

5.Разработване на подходи за откриване на повреди в микробни горивни клетки и диагностика основаващи се на интелигентна класификация и теорията на чувствителността.

Глава 2 Разработване на лабораторна система за изследване на микробна горивна клетка

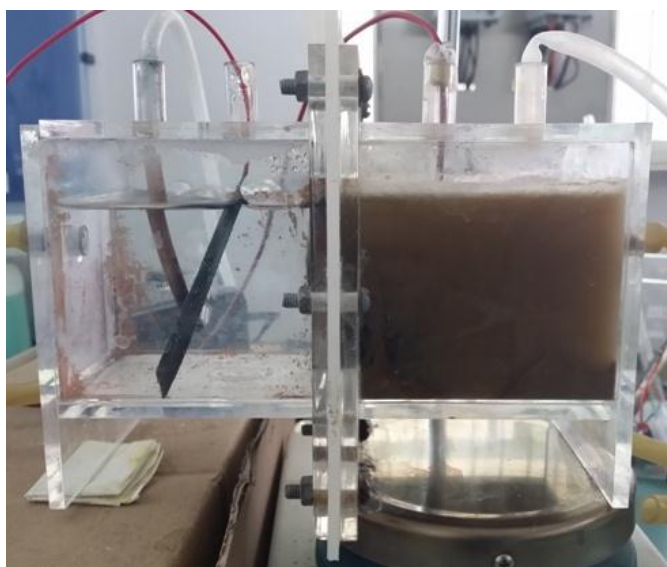
2.1.Лабораторна микробна горивна клетка

За целите на изследванията в настоящия дисертационен труд е разработена лабораторна микробна горивна клетка за пречистване на отпадъчни води, комплектувана със спомагателните подсистеми, необходими за нейното функциониране (Фиг.2.1). Микробната горивна клетка е двукамерна и е конструирана от анодна и катодна камера, разделени с протонно-обменна мембрана. Обемът на всяка една от камерите е $5.5 \cdot 10^{-5} m^3$. И в двете камери са монтирани въглеродни електроди. Анодното пространство е затворено, а катодното е отворено за контакт с околната среда.



Фиг.2.1 Схема на микробна горивна клетка със спомагателни подсистеми

В анодното пространство, постъпва анолит. За конкретния случай анолитът е „изкуствена“ отпадъчна вода съдържаща ацетат с определено pH , което се поддържа от инжекционна система за буферен разтвор. Пречистената в определена степен отпадъчната вода се извежда от анодното пространство. За нормално протичане на процеса в анодното пространство трябва да се осигурят анаеробни условия. В анодната камера са монтирани въглероден електрод, електрическа бъркалка и сензор за измерване на pH_a , а в катодната камера са монтирани сензори за pH_c и за разтворен кислород DO_c . Концентрацията на разтворен кислород DO_c в катодното пространство се поддържа на границата на насищане. Външният вид на конструираната микробна клетка, която е Н-тип е показана на Фиг.2.2



Фиг.2.2 Външен вид на конструираната микробна горивна клетка

2.2.Режимни параметри на микробната горивна клетка

Работата на разглеждания клас горивни клетки може да бъде характеризирана със следните режимни параметри: генерирано електрическо напрежение, сила на тока,

концентрация на разтворен кислород, рН в анодното и катодното пространство, проводимостта и температурата

2.3. Автоматична система за събиране на данни и управление на горивната клетка

Лабораторната микробна горивна клетка е комплектувана с PXI система на National Instruments за автоматично събиране на данни от сензорите и управление на горивната клетка, позволяваща тестване на управляващи алгоритми.

2.4. Експериментални изследвания на влиянието на рН върху процеса

Проведени са експериментални изследвания за влиянието на рН на католита върху степента на пречистване на отпадъчните води за две двукамерни микробни горивни клетки MFC1 и MFC2. MFC1 е с размери на анодната и катодна камера 8x8x8 см, а MFC2 с размери 20x20x20см. За различни стойности на рН в катодната камера се измерва ефективността на отстраняване на COD (Removal efficiency). Резултатите са представени в Таблица 2.1.

Таблица 2.1 Влияние на рН на католита върху степента на отстраняване на COD

MFC1 pH value	COD before treatment (mg L ⁻¹)	COD after treatment (mg L ⁻¹)	Removal efficiency	MFC2 pH value	COD before treatment (mg L ⁻¹)	COD after treatment (mg L ⁻¹)	Removal efficiency
7	500	347	30.6%	7	500	339	32.3%
6	347	256	26.2%	8	339	278	17.9%
5	256	196	23.4%	8.5	278	243	12.6%
4.5	196	141	28.1%				
4.2	141	116	17.7%				
Total	500	116	76.8%	Total	500	243	51.4%

Проведените изследвания показват, че чрез изменение на рН може да се управлява степента на пречистване на отпадъчните води по отношение на COD

Изводи към Глава 2

1. Разработена е лабораторна микробна горивна клетка за пречистване на отпадъчни води и генериране на електричество.
2. Създадена е автоматична система за измерване, събиране на данни на микробната горивна клетка.
3. Проведени са експериментални изследвания за влиянието на режимните параметри върху генерирането на електричество при пречистване на отпадъчни води и в частност влиянието на рН върху процеса
4. Поддържането на подходящо рН на разтвора може да осигури желано напрежение на изхода и степен на пречистване на отпадъчната вода.

Глава 3 Разработване на симулационни модели за изследване на микробни горивни клетки

3.1. Математичен модел и симулиране на микробни горивни клетки, като вниманието е съсредоточено върху концентрацията на реагентите

За създаване на математичен модел на микробна горивна клетка, последната се разглежда като съставена от две клетки – анодна и катодна. Анодната клетка работи в

анаеробни или аноксик условия. Катодната клетка работи при аеробни условия. Връзката между двете клетки се осъществява чрез протонно-обменна мембрана. В анодното пространство постъпва изкуствена отпадъчна вода – разтвор на метилов ацетат. За анодната камера са изведени уравненията описващи протичащи процеси. В анодната камера масовите баланси на ацетат, разтворен въглероден диоксид CO_2 , водородни протони H^+ и биомаса X се изразяват чрез следните диференциални уравнения:

$$V_a \frac{dC_{AC}}{dt} = Q_a (C_{AC}^{in} - C_{AC}) - A_m r_1 \quad (3.5)$$

$$V_a \frac{dC_{CO_2}}{dt} = Q_a (C_{CO_2}^{in} - C_{CO_2}) + 2A_m r_1 \quad (3.6)$$

$$V_a \frac{dC_H}{dt} = Q_a (C_H^{in} - C_H) + 8A_m r_1 \quad (3.7)$$

$$V_a \frac{dX}{dt} = Q_a \frac{(X^{in} - X)}{f_x} + A_m Y_{ac} r_1 - V_a K_{dec} X \quad (3.8)$$

В горните уравнения индексите 'in' и 'a' означават съответно концентрациите във входящия поток и че се отнася за анодната камера; X и C_{AC} са концентрациите на биомаса и ацетат в анодната камера; V_a , A_m и Q_a съответно са обемът на камерата, площта на напречното сечение на мембраната и обемният разход на флуид към анодната камера; f_x , Y_{ac} и K_{dec} са параметри както следва: реципрочни на измиващата фракция, бактериалния добив и константата на разпад.

Масовите баланси на биологичния процес включват поредица ензимни реакции при анаеробни или аноксик условия. Следователно окислението на ацетата в анодната камера може да бъде моделирано чрез уравнение Моно, имащо следния вид:

$$r_1 = k_1^0 \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{AC}}{K_{AC} + C_{AC}} X \quad (3.9)$$

където k_1^0 е константа на скоростта на анодната реакция при условие на максимална специфична скорост на растеж; α е коефициентът на пренос на заряди на анодната реакция; K_{AC} скоростната константа на полунарастване за ацетата; R е газова константа, T е температурата в микробната горивна клетка.

Балансът на зарядите в анода се определя от следната зависимост на анодния капацитет, свърх потенциала на анода и плътността на тока на микробната клетка:

$$C_a \frac{d\eta_a}{dt} = 3600 i_{mfc} - 8F r_1 \quad (3.10)$$

където C_a е капацитетът на анода.

За катодната камера концентрацията на разтворения O_2 на вход се разглежда като главна променлива за описание на динамиката на процеса в катодната камера.

В катодната камера масовите баланси на трите компонента: разтворен O_2 , хидроксилан анион OH^- , и катион M^+ , се представят със следните диференциални уравнения:

$$V_c \frac{dC_{O_2}}{dt} = Q_c (C_{O_2}^{in} - C_{O_2}) + A_m r_2 \quad (3.11)$$

$$V_c \frac{dC_{OH}}{dt} = Q_c (C_{OH}^{in} - C_{OH}) - 4A_m r_2 \quad (3.12)$$

$$V_c \frac{dC_M}{dt} = Q_c (C_M^{in} - C_M) + A_m N_M \quad (3.13)$$

В горните уравнения с индекса 'с' е означен катода; C_{O_2} е концентрацията на разтворения кислород в катодната камера; N_M е потокът на катиона M^+ , транспортиран от анодната камера към катода през протонно-обменната мембрана

$$N_M = \frac{3600i_{mfc}}{F} \quad (3.14)$$

Скоростта на реакцията в катодната камера може да бъде описана чрез уравнението на Butler-Volmer, понеже тя принадлежи към електрохимичните реакции, управлявани от електродвижещото напрежение и може да бъде представена като:

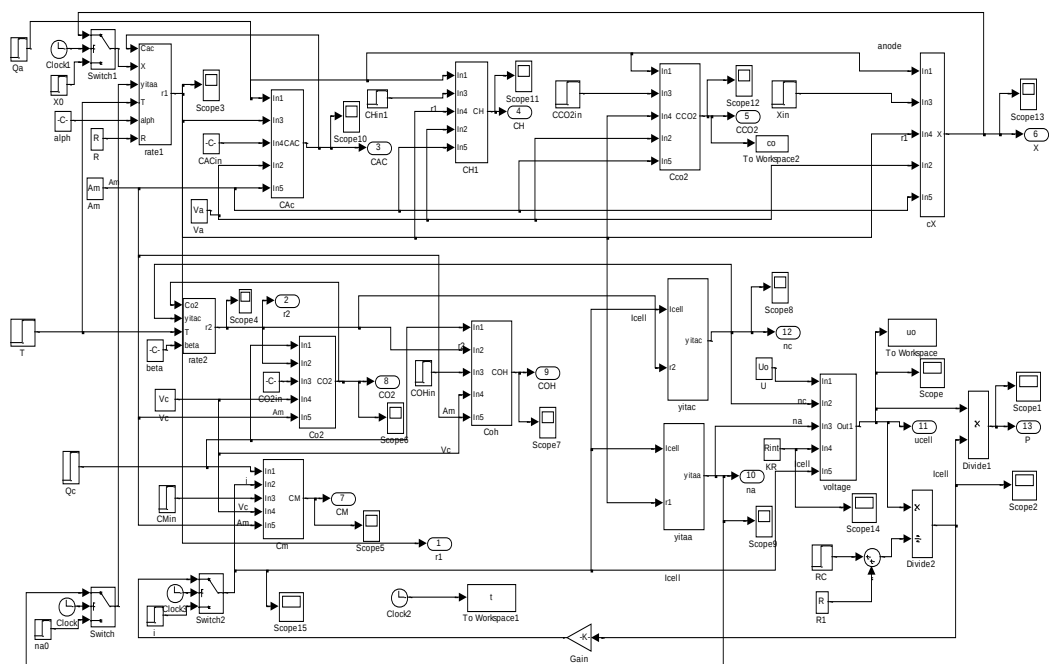
$$r_2 = -k_2^0 \exp[(\beta - 1) \frac{F}{RT} \eta_c] \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \quad (3.15)$$

където k_2^0 е константа на скоростта на реакцията на катода при стандартни условия; K_{O_2} е скоростта на полунарастване за разтворения кислород; β е коефициентът на пренос на заряди за катода.

Балансът на зарядите при катода може да бъде изразен чрез следната връзка на катодния капацитет, свръх потенциала на катода и плътността на тока в микробната горивна клетка:

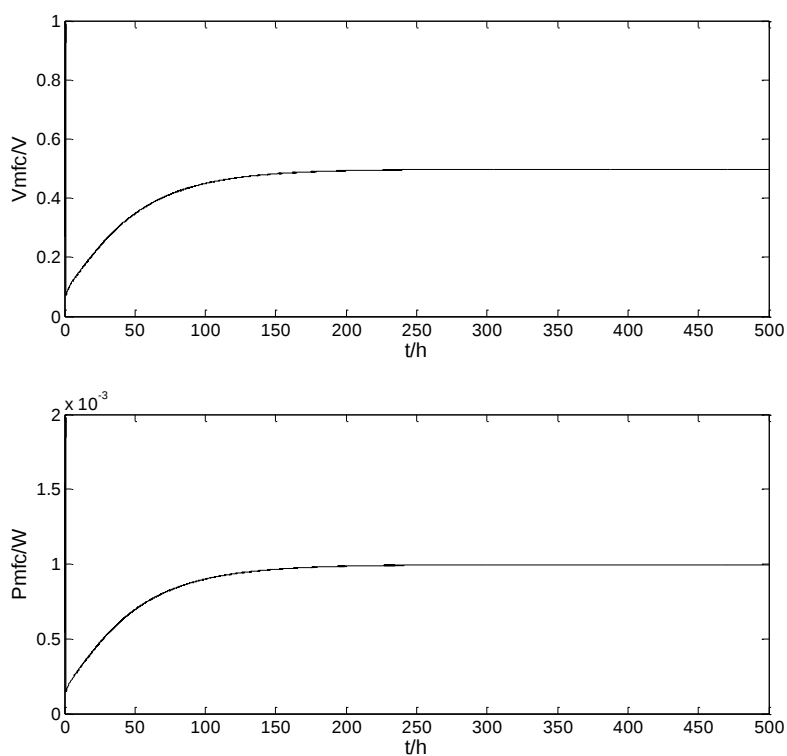
$$C_c \frac{d\eta_c}{dt} = -3600i_{mfc} - 4Fr_2 \quad (3.16)$$

където C_c е капацитета на катода.



Фигура 3.1 Пълен симулационен модел на двукамерна микробна горивна клетка, с акцент върху концентрацията на реагентите

Пълният симулационен модел на двукамерна микробна горивна клетка в среда Matlab/Simulink е показан на Фигура 3.1. Симулационните резултати за електрическото напрежение и мощността на изход от клетката са показани на Фигура 3.13.



Фигура 3.13 Резултати от изхода на симулационния модел за MFC

3.2. Математичен модел и симулиране на микробни горивни клетки с външна буферна подсистема за рН

За целите на разширяването на модела с външна буферна подсистема за рН, различните форми на представяне на концентрацията на водородни йони вероятно са най-голямата бариера за онлайн предаването на параметри. Поддържането на надеждно предаване на информационния поток изисква подходящ интерфейс за преобразуване на променливите, така че да се реализира преобразуването на променливите между основната система и външните подсистеми за да бъдат съвместими. По този начин стойностите на рН във всяка камера се използват като основни променливи на микробните горивни клетки, за да обслужват външните подсистеми, като се използва подходящото изчисление между концентрациите на водородния йон и стойностите на рН.

$$C_{\text{H}}^{\text{in}} = 10^{(-\text{pH}_a^{\text{in}})} \quad (3.19)$$

$$C_{\text{OH}}^{\text{in}} = 10^{[14 - \text{pH}_c^{\text{in}}]} \quad (3.20)$$

За целите на въвеждане на стойностите на рН в горния MFC модел, реакционните скорости на анодните и катодните камери трябва да бъдат модифицирани и представени чрез концентрациите на водородния йон и хидроксилния йон. Скоростта на реакциите може да бъде представена чрез модела на Моно и уравнението на Butler-Volmer, както следва:

$$r_1 = k_1^0 \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{\text{H}}}{K_{\text{H}} + C_{\text{H}}} X \quad (3.21)$$

$$r_2 = -k_2^0 \exp\left[(\beta - 1) \frac{F}{RT} \eta_c\right] \frac{C_{\text{OH}}}{K_{\text{OH}} + C_{\text{OH}}} X \quad (3.22)$$

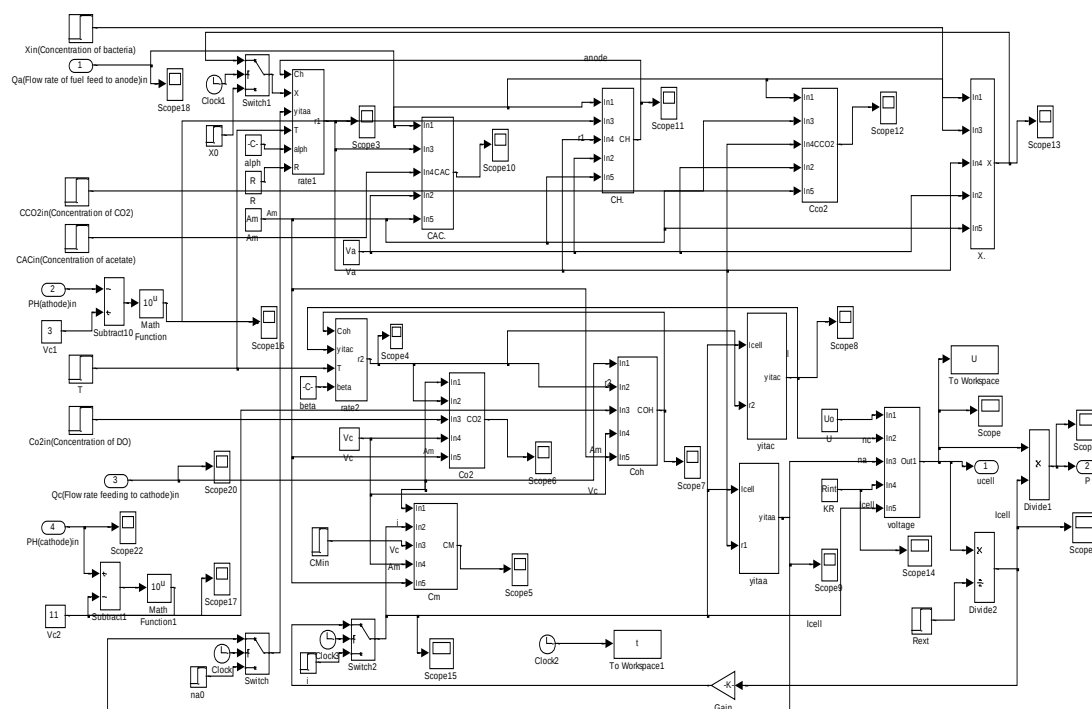
където k_1^0 е скоростната константа на анодната реакция при условия на максимална специфична скорост на растеж, k_2^0 е скоростната константа на катодната реакция при стандартното състояние. α и β са коефициентите на предаване на реакционния заряд съответно в анода и катода. K_{H} и K_{OH} са скоростните константи на полунарастване за водородния йон и хидроксилния йон. R и T са съответно газовата константа и работната температура.

Другите уравнения за описване на масовите баланси и балансите на заряда в анодните и катодните камери са същите както са представени по-горе за случая, когато фокусът е върху концентрацията на реагентите.

Изходното напрежение V_{mfc} на двукамерна микробна горивна клетка може да се изчисли по изрази:

$$V_{\text{mfc}} = V^0 - \eta_a + \eta_c - \left(\frac{d^{\text{m}}}{k^{\text{m}}} + \frac{d^{\text{mfc}}}{k^{\text{aq}}}\right) i_{\text{mfc}} \quad (3.24)$$

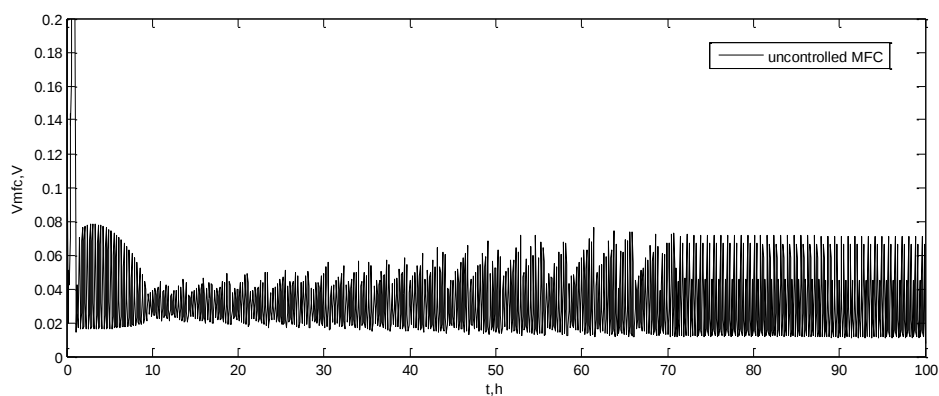
където V^0 е напрежението на отворена верига. d^{mfc} и d^{m} са съответно разстоянието между електродите и дебелината на мембраната. k^{aq} и k^{m} са съответно проводимостта на разтвора и мембраната.



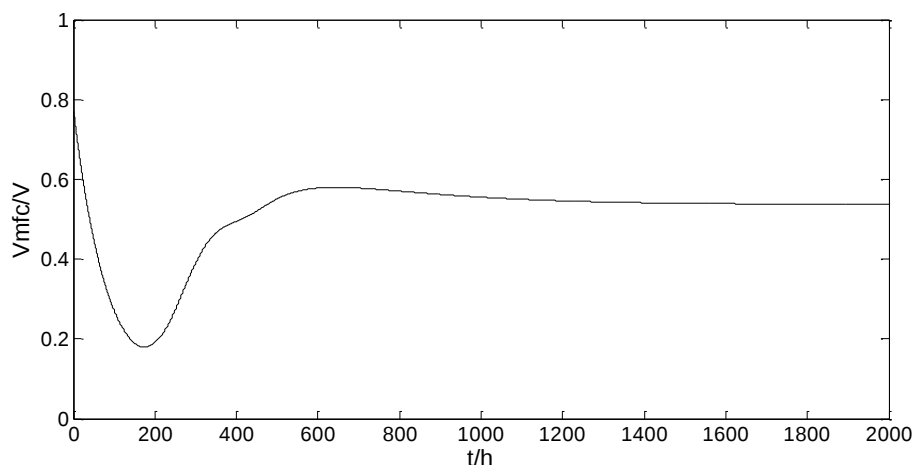
Фигура 3.17 Пълен симулационен модел на двукамерна микробна горивна клетка, с акцент върху условията на pH

Симулационният модел на двукамерна микробна горивна клетка в среда Matlab/Simulink с акцент върху условията на pH е показан на Фигура 3.17.

Проведени са симулационни изследвания за две микробни горивни клетки съответно с обем на всяка от камерите от по 0.55 литра и 5.5 литра, като резултатите са показани на Фигура 3.20 и 3.21.



Фигура 3.20 Симулационен резултат на изходното напрежение на MFC модел с обем 0.55 литра



Фигура 3.21 Симулационен резултат на изходното напрежение на 5.5-литров MFC модел

3.3. Математичен модел и симулиране на микробна горивни клетки с два субстрата

Понеже множеството субстрати обикновено участват в анодната реакция, микробна горивна клетка с два вида субстрат се счита за удовлетворяваща изискването за откриване и диагностика на неизправности. За установяване на модела на реакциите в уравнения (1.7) и (1.8), концентрациите на глюкоза и глутаминова киселина и концентрацията на кислород се избират като две основни променливи в анодните и катодните камери.

Скоростта на глюкозната реакция r_{11} , реакционната скорост на глутаминова киселина r_{12} и скоростта на катодната реакция r_2 могат да се представят с модел на Моно както следва:

$$r_{11} = k_{11}^0 \exp\left(\frac{\alpha_1 F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{gl}}{K_{gl} + C_{gl}} X \quad (3.38)$$

$$r_{12} = k_{12}^0 \exp\left(\frac{\alpha_2 F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{gla}}{K_{gla} + C_{gla}} X \quad (3.39)$$

$$r_2 = -k_2^0 \exp\left[(\beta - 1) \frac{F}{RT} \eta_c\right] \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \quad (3.40)$$

където k_{11}^0 е скоростната константа на реакцията на глюкозата при условие на максимална специфична скорост на растеж, k_{12}^0 е константа на скоростта на реакция на глутаминова киселина в състояние на максимална специфична скорост на растеж, k_2^0 е скоростната константа на реакцията в катодната камера при стандартното състояние; α_1 и α_2 са коефициентите на трансфер на реакционен заряд съответно на глюкоза и глутаминова киселина. β е коефициентът на пренасяне на реакционния заряд на катода. K_{gl} , K_{gla} и K_{O_2} са константите за половин скорост на нарастване съответно за глюкоза, глутаминова киселина и разтворен кислород. C_{gl} , C_{gla} и C_{O_2} са концентрациите на глюкоза, глутаминова киселина и разтворен кислород. R и T са газовата константа и работната температура, съответно. F е константата на Фарадей.

Ако се приема, че както анодните, така и катодните камери могат да се разглеждат като реактор с идеално смесване, масовите баланси на петте компонента в анодната камера могат да бъдат описани както следва:

$$V_a \frac{dC_{gl}}{dt} = Q_a (C_{gl}^{in} - C_{gl}) - A_m r_{11} \quad (3.41)$$

$$V_a \frac{dC_{gla}}{dt} = Q_a (C_{gla}^{in} - C_{gla}) - A_m r_{12} \quad (3.42)$$

$$V_a \frac{dC_H}{dt} = Q_a (C_H^{in} - C_H) + 24A_m r_{11} + 17A_m r_{12} \quad (3.43)$$

$$V_a \frac{dC_{CO2}}{dt} = Q_a (C_{CO2}^{in} - C_{CO2}) + 24A_m r_{11} + 17A_m r_{12} \quad (3.44)$$

$$V_a \frac{dX}{dt} = Q_a \left(\frac{X^{in} - X}{f_x} \right) + A_m Y_{AW} (r_{11} + r_{12}) - V_a K_{dAW} X \quad (3.45)$$

Масовите баланси на трите компонента в катодната камера се представят чрез следните изрази:

$$V_c \frac{dC_{OH}}{dt} = Q_a (C_{OH}^{in} - C_{OH}) - 4A_m r_2 \quad (3.46)$$

$$V_c \frac{dC_{O_2}}{dt} = Q_a (C_{O_2}^{in} - C_{O_2}) + A_m r_2 \quad (3.47)$$

$$V_c \frac{dC_M}{dt} = Q_c (C_M^{in} - C_M) + A_m N_M \quad (3.48)$$

В горните уравнения индексите "a", "c" и "in" означават съответно анода, катода и хранявания поток. C_H , C_{gl} , C_{gla} , C_{CO2} и X са концентрациите на водороден йон, глюкоза, глутаминова киселина, въглероден диоксид и биомаса съответно в анодната камера. C_{OH} , C_{O_2} и C_M са концентрациите на хидроксилен йон, разтворен кислород и катион M^+ в катодната камера, съответно. V , A_m и Q са обемът на камерата, площта на напречното сечение на мембраната и разхода на флуид към съответната камера. N_M е потокът от катион M^+ , транспортиран от анодна към катодна камера през мембраната, който може да бъде изразен както следва:

$$N_M = \frac{3600 i_{mfc}}{F} \quad (3.49)$$

където i_{mfc} е плътността на тока на единична микробна горивна клетка, която може да бъде описана от следното уравнение

$$i_{mfc} = F \sum_i z_i N_i \quad (3.50)$$

където z_i е броят на зарядите на i -тия вид и N_i е повърхностният поток на i -тия вид. Балансите на зарядите в анодните и катодните камери се определят от следните зависимости на капацитета, свръх напрежението и плътността на тока:

$$C_a \frac{d\eta_a}{dt} = 3600i_{mfc} - 24F(r_{11} + r_{12}) \quad (3.51)$$

$$C_c \frac{d\eta_c}{dt} = -3600i_{mfc} - 4Fr_2 \quad (3.52)$$

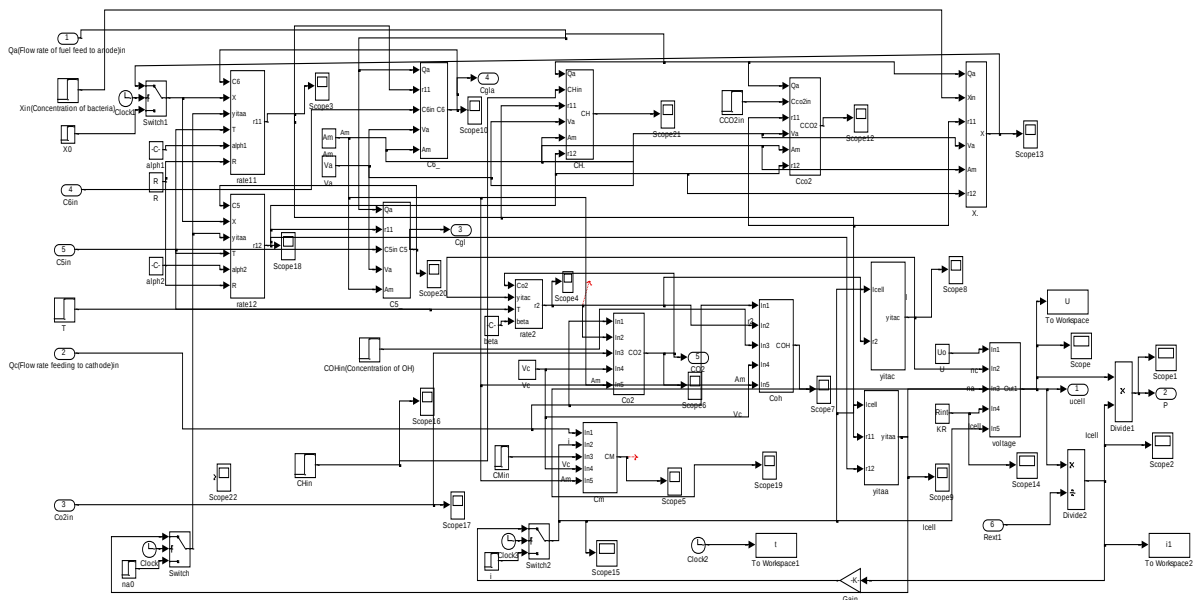
където C_a и C_c са съответно капацитетите на анода и катода. η_a и η_c са съответно анодния и катодния свръх потенциали.

Изходното напрежение V_{mfc} на една микробна горивна клетка може да се изчисли от напрежението на отворена верига, свръх потенциал на анода и катода съгласно следното уравнение:

$$V_{mfc} = V^0 - \eta_a + \eta_c - \left(\frac{d^m}{k^m} + \frac{d^{mfc}}{k^{aq}} \right) i_{mfc} \quad (3.53)$$

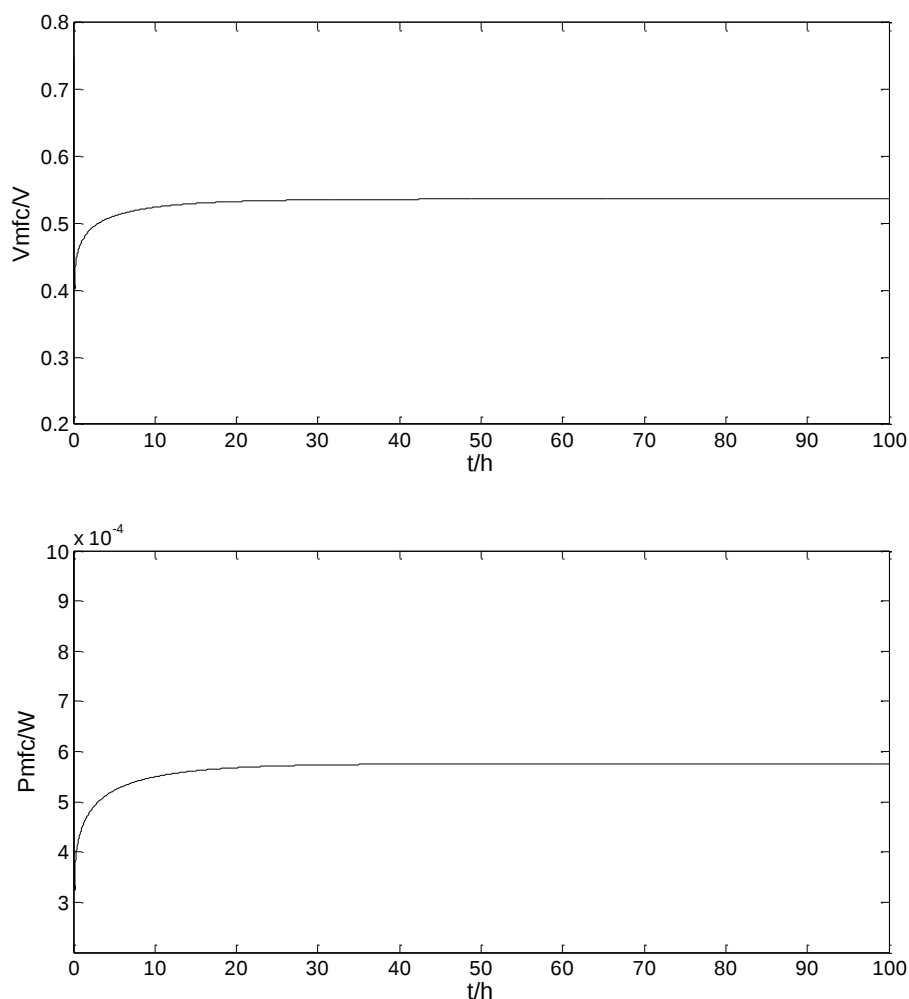
където V^0 е напрежението на отворена верига. d^{mfc} и d^m са съответно разстоянието между електродите и дебелината на мембраната. k^{aq} и k^m са съответно проводимостта на разтвора и мембраната.

Въз основа на описания по-горе математически модел е разработен симулационен модел в среда Matlab/Simulink с фокус върху два вида субстрати. Симулационната схема е показана на Фигура 3.22



Фигура 3.22 Общ симулационен модел на двукамерна микробна горивна клетка, с фокус върху двата вида субстрат

Чрез използването на набор от стойности на параметрите за симулационния модел на MFC за два субстрата - смес от глюкоза и глутаминова киселина са извършени симулации и резултатите са показани на Фигура 3.25.



Фигура 3.25 Резултати от симулацията на MFC със смес от глюкоза и глутаминова киселина модел

Изводи към Глава 3

- 1.Разработен и е изследван симулационен модел на двукамерна микробна горивна клетка с един субстрат.
- 2.Създаден е специален блок за включване на рН на анолита като управляваща променлива. Разработеният блок е свързан със симулационния модел.
- 3.Разработен е и е изследван симулационен модел на микробна горивна клетка с два различни субстрата – глюкоза и глутаминова киселина.
- 4.Представени са резултатите от изследванията на симулационните модели.

Глава 4 Размито управление на микробни горивни клетки

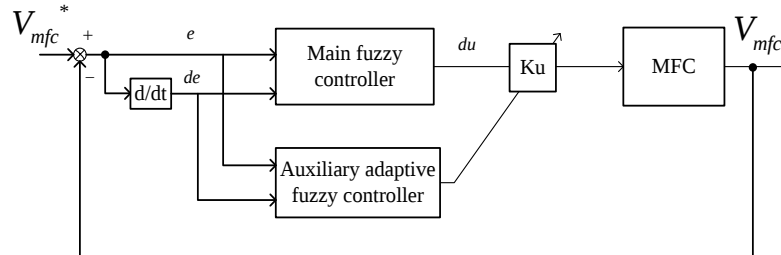
За разглежданите микробни горивни клетки са разработени както следва: адаптивно размито управление, едномерно моделно предсказващо управление за SISO обект и многомерно моделно предсказващо управление за MIMO обект базирано на онлайн FRIT подход и RLS алгоритъм. Целта на управление на клетките е стабилизиране на

генерираното от нея напрежение. Изброените алгоритми за управление са тествани с разработените и описани по-горе симулационни модели.

4.1.Размито управление на микробни горивни клетки

Адаптивното размито управление е предназначено за преодоляване на ефекта от неопределеностите и измененията в параметрите на микробните горивни клетки, намаляване на статичната грешка и подобряване на динамичните характеристики на системата

Структурата на разработената затворена адаптивна размита управляваща система е показана на Фигура 4.3.



Фигура 4.3 Схема на затворената система за адаптивно размито управление

Целта на системата за управление е поддържане на изходното напрежение на микробната горивна клетка V_{mfc} на зададена стойност V_{mfc}^* . Грешката на регулиране $e(k)$ е дефинирана със следния израз:

$$e(k) = V_{mfc}^* - V_{mfc} \quad (4.20)$$

За да може системата за управление на микробни горивни клетки да поддържа постоянно напрежение на изхода, бърза реакция на смущенията и минимална статична грешка, при бързо изменящо се натоварване са взети следните решения:

- 1) В качеството на управляващо въздействие за стабилизиране на генерираното от клетката напрежение е избран моларният разход на гориво към анодната камера.
- 2) Системата за управление съдържа главен размит регулатор, входове на който са грешката на регулиране и нейната производна.
- 3) В схемата за управление е включен и спомагателен адаптивен размит контролер за регулиране на коефициента на пропорционалност K_u на главния размит контролер. Целта е намаляване на статичната грешка на изход на системата за автоматично регулиране

Входове на главния и на спомагателния контролер са грешката на регулиране $e(k)$ и нейната производна $ec(k)$. Изразите, по които се изчисляват са дадени по-долу. Представен е и изразът, по който се изчислява стойността на управляващата променлива $u(k)$ за главния контролер

$$e(k) = V_{mfc}^* - V_{mfc} \quad (4.21)$$

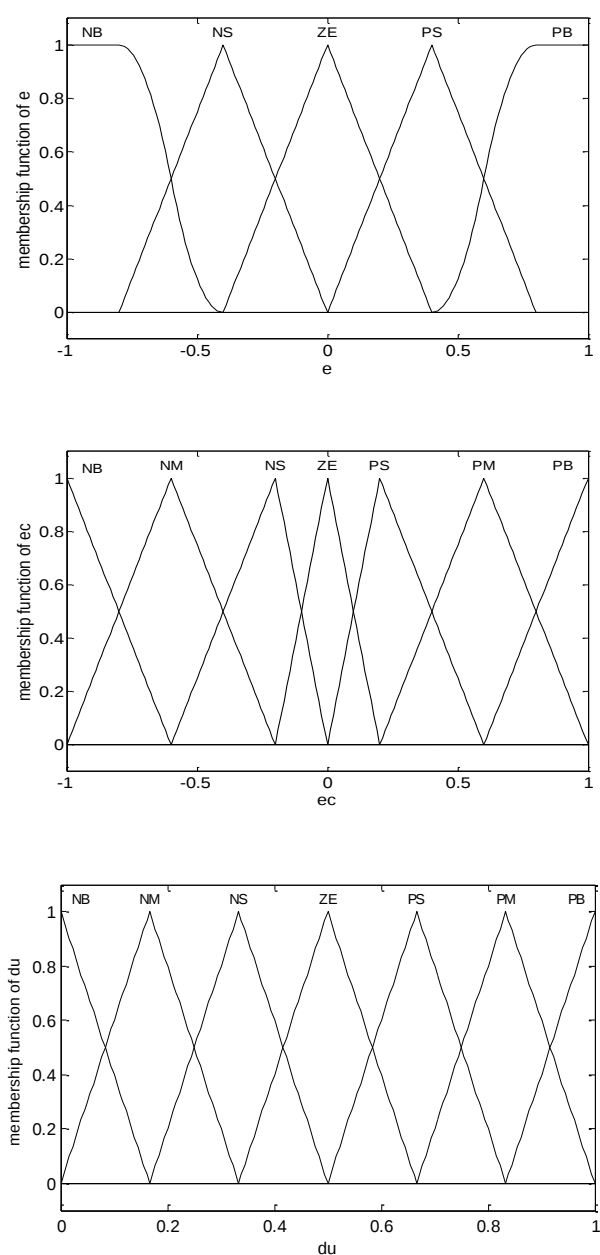
$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.22)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4.23)$$

$\Delta u(k)$ е изменение на управляващото въздействие, генерираното от главния контролер

За грешката на регулиране, производната на грешката и изменението на управляващата променливи са избрани триъгълни функции на принадлежност. Диапазоните на изменение на размитите променливи са както следва: за e и ec диапазонът на изменение е $[-1, 1]$, а за du е $[0, 1]$. Стойностите на размитата променлива e са $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, а стойностите на ec и du са $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$. Функциите на принадлежност за входната грешка e , производната на грешката ec и изменението на управлението на изхода в главния размит контролер са показани на Фигура 4.4.

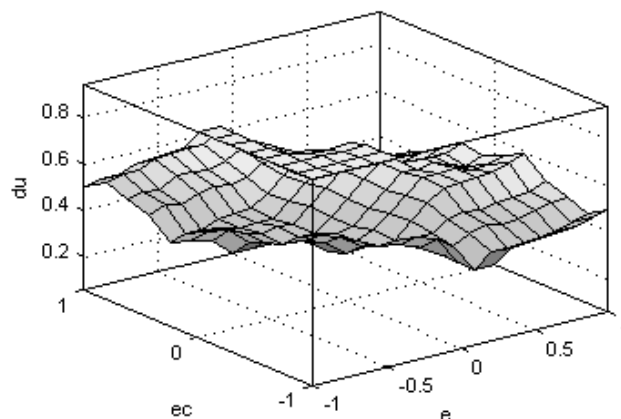
Изход u на главния размит контролер е моларният разход на подаване на гориво към анода Q_a . Управляващите правила за главния размит контролер са показани в Таблица 4.1. На Фигура 4.5 тримерно е представено изменението на управляващата променлива du за размитите променливи (e, ec).



Фигура 4.4 Функции на принадлежност за основния размит контролер

Таблица 4.1 Управляващи правила за главния размит контролер

Δu		E_c						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
	NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
	PB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB



Фигура 4.5 3D представяне на управляващите правила на главния размит контролер

За да се намали статичната грешка е разработен допълнителен размит контролер, който изменя коефициента на пропорционалност K_u на главния контролер. Грешката на регулиране e^* , нейната производна ec^* и управляващия изход K_u на спомагателния размит контролер се изчисляват по изразите:

$$e^*(k) = V_{mfc}^* - V_{mfc} \quad (4.24)$$

$$ec^*(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.25)$$

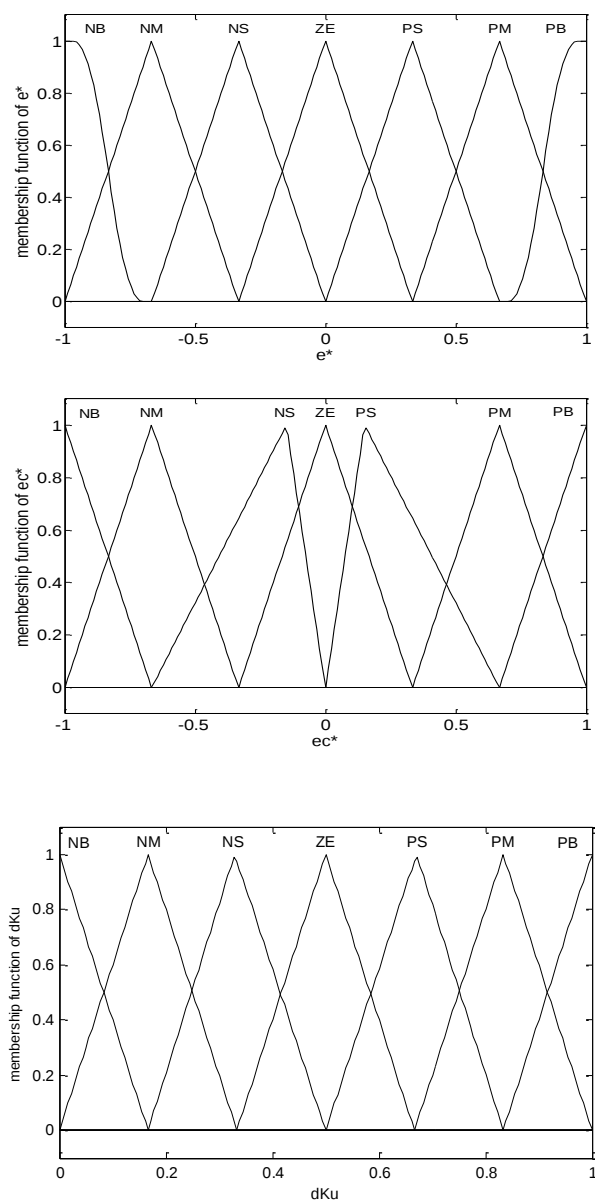
$$K_u(k) = K_u(k-1) + \Delta K_u(k) \quad (4.26)$$

където $\Delta K_u(k)$ е изменението на коефициента на усилване на спомагателния размит контролер.

Функциите на принадлежност са триъгълни. Диапазонът на изменение на размитите променливи – грешка на регулиране e^* и производна на грешката на регулиране ec^* е в интервала $[-1,1]$ и за dK_u е в интервала $[0,1]$. Стойностите на размитите променливи за e^* , ec^* и dK_u са $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$. На Фигура 4.6 са представени функциите на принадлежност за грешката на регулиране e^* , производната на грешката ec^* и изменението на управляващото въздействие dK_u в спомагателния размит контролер.

Изходът K_u на спомагателния адаптивен размит контролер е проектиран в размерностите на коефициента на пропорционалност в главния контролер. Базата с

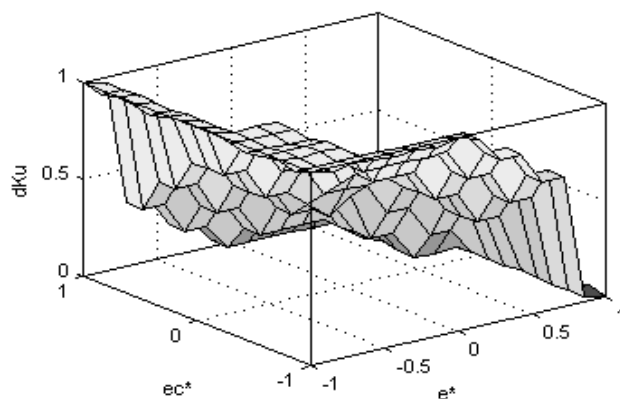
правила на допълнителния контролер е представена в Таблица 4.2, а изменението на управляващата променлива dK_u като функция на размитите променливи (e^* , ec^*) е представено в 3D формат на Фигура 4.7.



Фигура 4.6 Функции на принадлежност на спомагателния размит контролер

Таблица 4.2 База с правила за спомагателния размит контролер

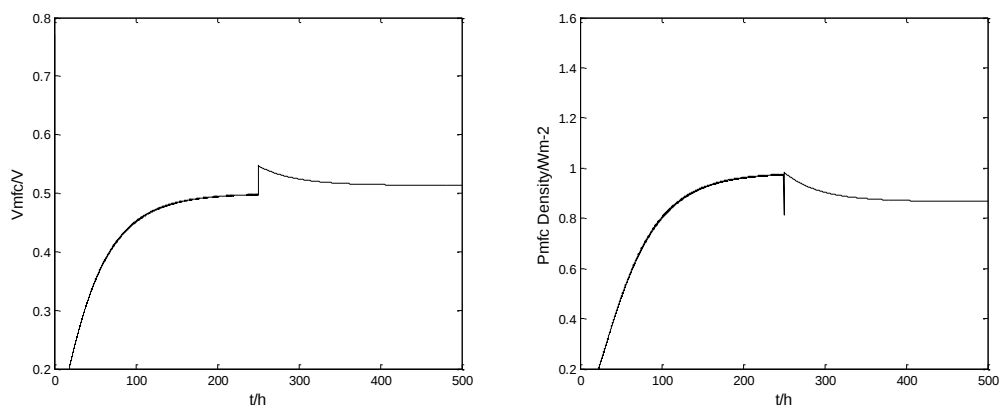
ΔK_u		ec^*						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e^*	NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
	NS	PB	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB
	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB



Фигура 4.7 3D изображение на допълнителния размит контролер

За да се провери ефектът от управлението в резултат на прилагане разработените два размити регулатора – главен и допълнителен са проведени симулационни изследвания. Зададената стойност на изходното напрежение от микробната горивна клетка е $0.5V$.

За да се види в каква степен се компенсират смущенията, са проведени тестове при бързи изменения на натоварването, което се постига чрез изменение на външното съпротивление от 500Ω на 600Ω за време от 250 часа. При отсъствие на система за автоматично регулиране микробната горивна клетка не може да поддържа постоянна стойност на изходното напрежение - Фигура 4.8. Когато външното съпротивление се промени от 500Ω на 600Ω по време на 250 часа, изходното напрежение на микробната горивна клетъчна система претърпява очевидно изменение и след това се стабилизира със статична грешка след значителен период от време.

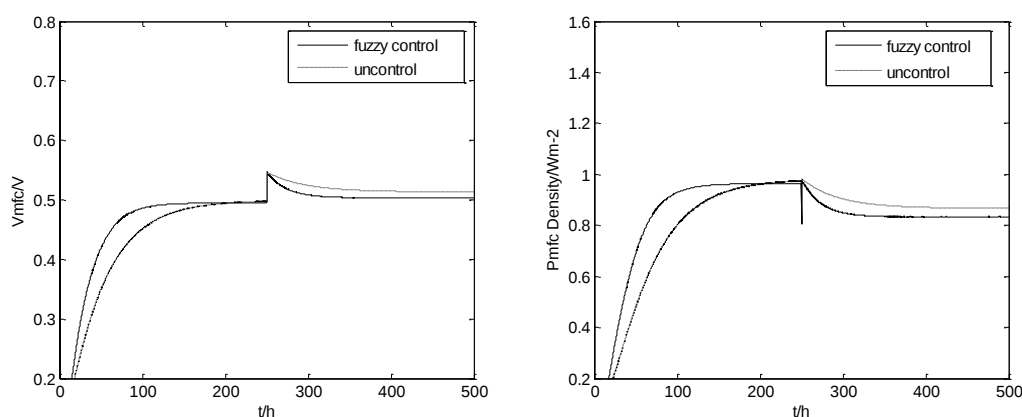


Фигура 4.8 Резултати от симулацията на неуправляема микробна горивна клетка

За да се потвърди възможността за практическо приложение на проектирания размит адаптивен контролер с цел постигане на постоянно изходно напрежение на клетката за управляващо въздействие е избран моларният разход на подаваното гориво към анода.

За да се потвърдят положителните качества на адаптивния размит контролер в термините на точност и скорост на реакция, резултатите от симулацията на система за автоматично регулиране с адаптивния размит контролер се сравняват с резултатите от размитото управление. За схемата на размито управление, количествените фактори са

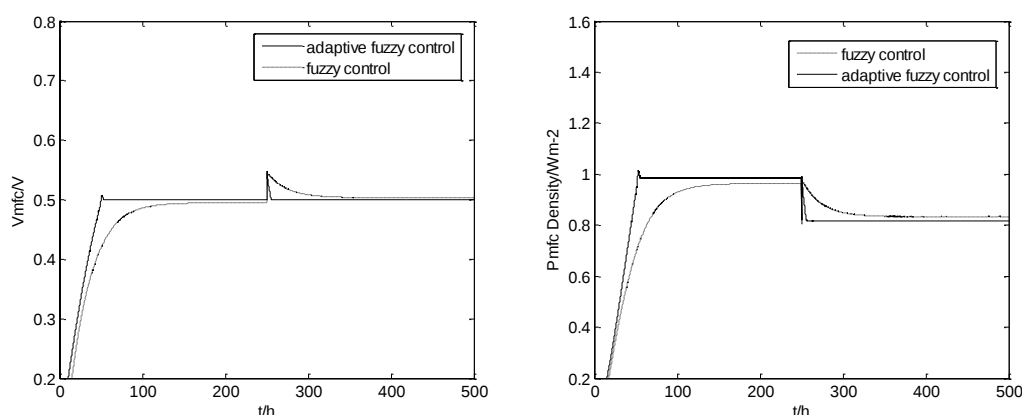
$K_e=1/2.25e-5$, $K_{ec}=0.001$ и $K_u=8.28e-5$, а резултатите от симулацията сравняващи размито управление с отворена система, включваща само микробна горивна клетка са показани на Фигура 4.9.



Фигура 4.9 Резултати от симулацията на MFC с размито управление и без управление

За система за автоматично регулиране с адаптивно размито управление параметрите на главния размит контролер са $K_e=1/2.25e-5$, $K_{ec}=0.001$, а K_u се настройва от помощния адаптивен размит контролер. Помощният контролер е проектиран за три режима на работа, а именно преди достигане на зданието, приближаването на стационарното състояние и състояние на пререгулиране. Трите режима се проектират предварително.

Ако изходното напрежение на MFC е по-малко от 0.49V, параметрите на допълнителния контролер са $K_e=1/2.25e-5$, $K_{ec}=0.001$ и $K_u=1.7e-4$. Ако изходното напрежение на MFC е по-голямо от 0.5V параметрите на контролера са $K_e=1/2.25e-5$, $K_{ec}=0.001$ и $K_u=8.72e-4$. Ако напрежението на MFC е между 0.49V и 0.5BV, параметрите имат стойност $K_e=1/2.25e-5$, $K_{ec}=0.001$ и $K_u=3.42e-4$. Въз основа на симулационни изследвания е направено сравнение между адаптивното размито управление и размитото управление. Резултатите са показани на Фигура 4.10.



Фигура 4.10 Резултатите от симулацията сравняват адаптивното размито управление с размит контрол

От симулационните резултати се вижда, че адаптивният размит контролер има по-голямо бързодействие и по-висока точност в сравнение с размития регулатор.

Адаптивният размит контролер в системата за автоматично регулиране на микробна горивна клетка поддържа постоянното изходно напрежение, дори при условия на бързи промени в натоварването.

Изводи към Глава 4

1. Разработена е адаптивна размита управляваща система за микробни горивни клетки. Контролерът включва главен размит контролер и спомагателен адаптивен размит контролер, който настройва коефициента на усилване на главния контролер. Функциите на принадлежност и базата с правила са създадени въз основа на експерименти и знания.

2. Адаптивният размит контролер има възможност да самонастройва размитите параметри за постигане на робастност и нечувствителност по отношение на външните смущения и е много по-добър от размития регулатор по отношение на поведението му в статичен режим. Контролерът може да поддържа постоянно напрежение на изхода на микробната горивна клетка даже и в условия на бързо изменение на натоварването.

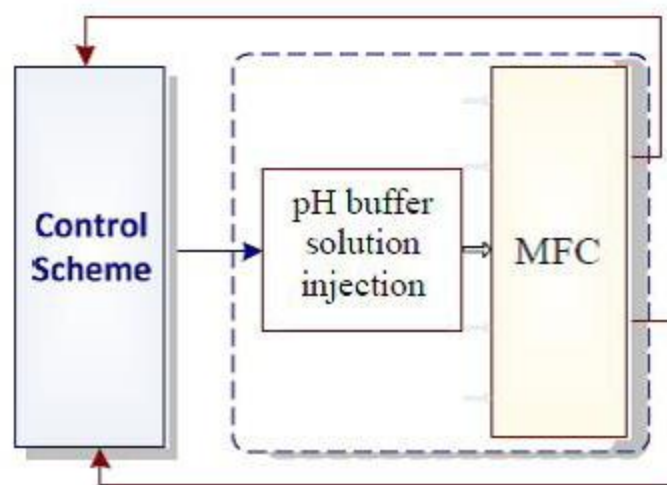
3. Разработени са и са изследвани три различни контролера, а именно размит контролер, размит контролер, работещ в режим на хлъзгане и адаптивен размит регулатор работещ в режим на хлъзгане. Последният регулатор е разработен на базата на динамичен модел на микробна горивна клетка с протонно-обменна полимерна мембрана.

4. Адаптивният размит регулатор работещ в режим на хлъзгане дава по-бърз преходен процес и по-малка статична грешка в сравнение с размития контролер и размития контролер, работещ в режим на хлъзгане и възможности за адаптация с цел компенсиране на смущенията.

Глава 5 Моделно предсказващо управление на микробни горивни клетки

5.1. Едномерно моделно предсказващо управление на микробна горивна клетка

За да се постигне стабилизиране на генерираното напрежение от микробна горивна клетка е разработен система за управление на базата на моделно предсказващо управление за обект с един вход и един изход SISO. Структурата на системата за управление е показана на Фигура 5.2.



Фигура 5.2 Структура на система за моделно предсказващо управление на микробна горивна клетка

Възможно е поддържане на постоянна стойност на напрежението, генерирано от микробната горивна клетка, чрез рН на входящото гориво в анодната камера. За схемата на Фигура 5.2 управляващо въздействие е разходът на буферен разтвор, който от своя страна управлява рН на вход в анодната камера.

От гледна точка на реализиране на моделно предсказващо управление моделът на микробната горивна клетка за разглеждания случай е с един вход и един изход (SISO)

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{pmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{pmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{pmatrix}}^A \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{pmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{pmatrix}}^B \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{pmatrix} o_m & 1 \end{pmatrix} \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix}}^{x(k)} \end{aligned} \quad (5.50)$$

в която $\Delta u(k)$ е дефинирано съгласно следния израз

$$\Delta u(k+1) = u(k+1) - u(k) \quad (5.51)$$

Изходното напрежение на управляемата микробна горивна клетка V_{mfc} трябва да бъде поддържано на зададена стойност V_{mfc}^* . Отклонението на прогнозните модели от действителните изходни напрежения се изчислява във всеки един такт на дискретизация и се счита за грешка, която се изчислява по следния израз:

$$e(k) = V_{mfc}^* - V_{mfc} \quad (5.52)$$

Траекторията на управляващото въздействие за следващите N_c такта се изчислява на базата на минимизиране на целевата функция J при ограничения, наложени върху регулируемата променлива u и ограничения върху управляващата променлива Δu . Бъдещите стойности на променливите на състоянието се изчисляват за дискретни моменти на времето по следните изрази:

$$\begin{aligned} x(k_i + 1 | k_i) &= Ax(k_i) + B\Delta u(k_i) \\ x(k_i + 2 | k_i) &= Ax(k_i + 1 | k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\ &= A^2 x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\ &\vdots \\ x(k_i + N_p | k_i) &= A^{N_p} x(k_i) + A^{N_p-1} B\Delta u(k_i) \\ &\quad + A^{N_p-2} B\Delta u(k_i + 1) \\ &\quad + \dots + A^{N_p-N_c} B\Delta u(k_i + N_c - 1) \end{aligned} \quad (5.53)$$

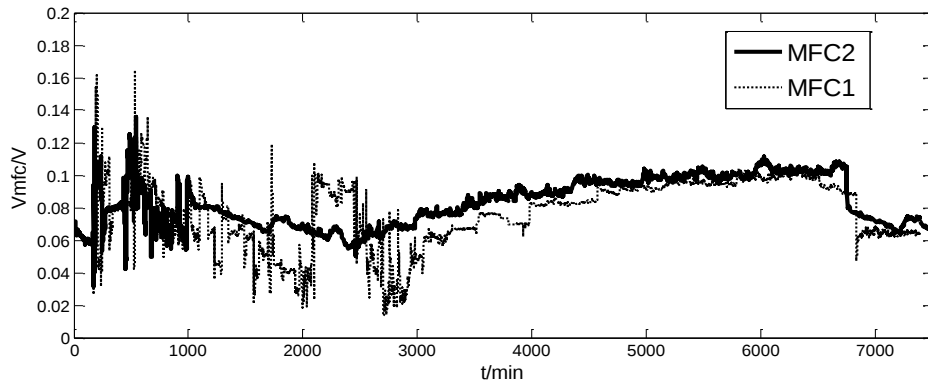
Прогнозните стойности на изходните променливи y могат да бъдат изчислени чрез заместване на предсказаните променливи на състоянието x в стандартната форма на модел в пространство на състоянието.

$$\begin{aligned}
y(k_i + 1|k_i) &= CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \\
y(k_i + 2|k_i) &= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i + 1) \\
y(k_i + 3|k_i) &= CA^3x(k_i) + CA^2B\Delta u(k_i) + CAB\Delta u(k_i + 1) \\
&\quad + CB\Delta u(k_i + 2) \\
&\quad \vdots \\
y(k_i + N_p|k_i) &= CA^{N_p}x(k_i) + CA^{N_p-1}B\Delta u(k_i) \\
&\quad + CA^{N_p-2}B\Delta u(k_i + 1) \\
&\quad + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i + N_c - 1)
\end{aligned} \tag{5.54}$$

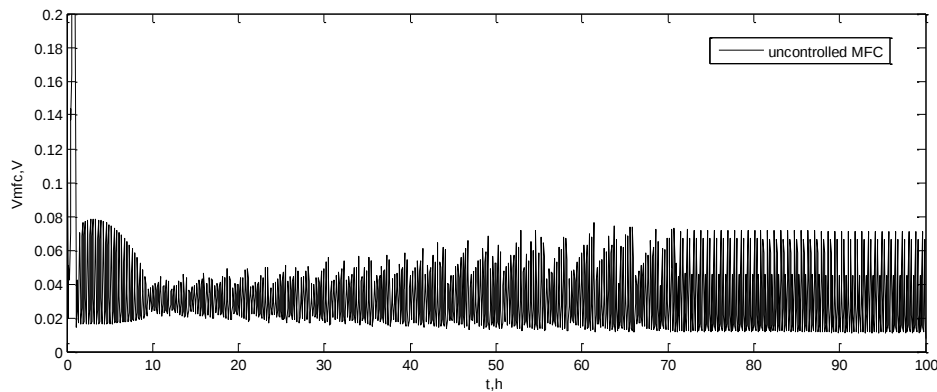
където N_p е прогнозният хоризонт, N_c е управляващият хоризонт, а предсказаните променливи на състоянието и предсказаните изходи са $x(k_i+m|k_i)$ и $y(k_i+m|k_i)$ при k_i+m , при наличие на текуща информация за обекта $x(k_i)$.

Параметрите за настройка на MPC алгоритъма са теглата в целевата функция и дължината на предсказващия и управляващия хоризонт.

Резултатите от измерванията на генерираното напрежение от лабораторни микробни горивни клетки и от симулационни модели са представени на Фигура 5.3 и Фигура 5.4.



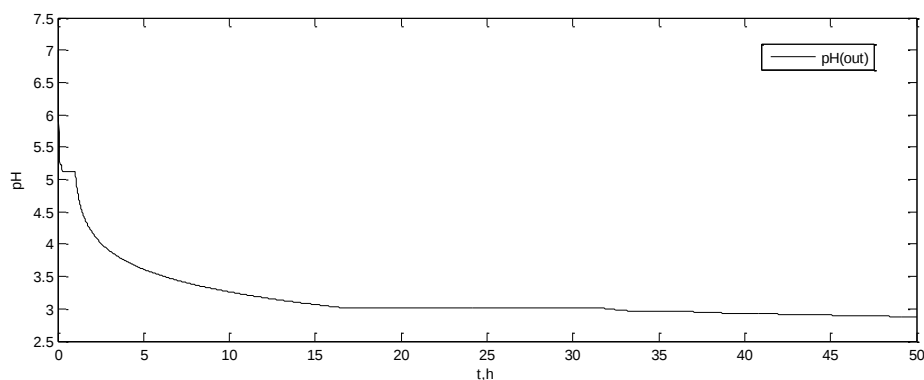
Фигура 5.3 Измерени стойности на генерираното напрежение от микробни горивни клетки



Фигура 5.4 Стойности на напрежението за симулирана микробна горивна клетка

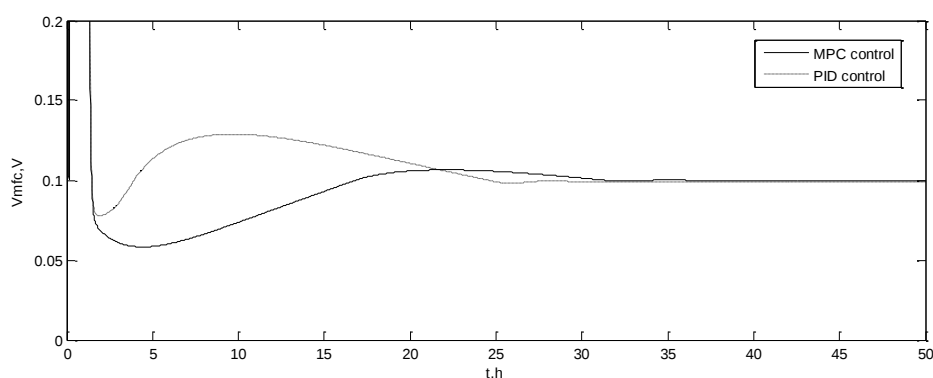
В нормалното състояние без контролер в системата изходното напрежение на микробната горивна клетка непрекъснато се колебае от началото на процеса до края, което се вижда от Фигура 5.4.

За да се постигне желаното постоянно напрежение генерирано от клетката, контролерът е проектиран да регулира входната стойност на рН на разтвора към анодната камера. Въз основа на моделно предсказващо управление за предсказващ и управляващ хоризонт, съответно 20 и 4, се получава преходният процес на рН на входния поток към анодната камера.



Фигура 5.5 рН входния поток към анодната камера

Направено е сравнение между системи за автоматично регулиране на напрежението генерирано от микробна горивна клетка. Едната система за регулиране е с моделно предсказващо управление, а другата с пропорционално-интегрален-диференциален (PID) регулатор (Фигура 5.6)



Фигура 5.6 Резултати от управление на микробна горивна клетка с моделно предсказващо управление и PID регулатор

Системата с PID регулатор се характеризира с пререгулиране и по-голямо време за затихване на преходния процес в сравнение с моделно предсказващото управление.

5.2. Адаптивно многомерно моделно предсказващо управление на микробна горивна клетка

Микробната горивна клетка се разглежда като обект с много входове и много изходи (MIMO). Взаимната връзка между разходите на входните потоци и тяхното рН може едновременно да повлияе върху рН на всяка една от камерите в клетката.

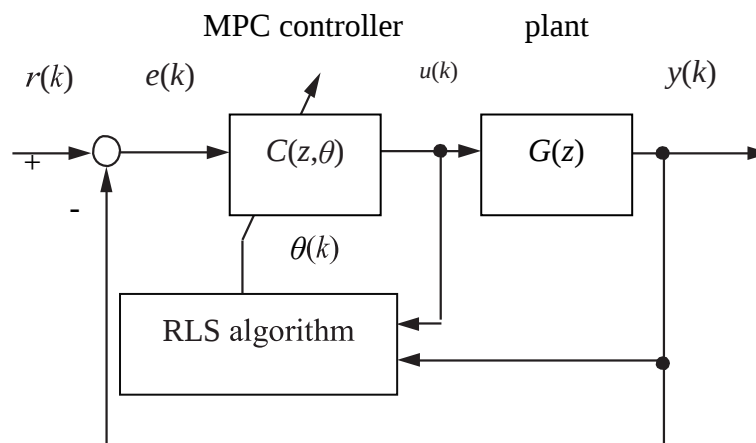
MPC контролерът има потенциала да предостави ефективен подход за управление на нелинейни динамични системи с множество параметри на процесите и ограничителни условия, гарантиращи, че системите отговарят на очакваното ниво на ефективност. Системите за MPC управление с множествени входове и изходи обаче също имат някои

недостатъци и резултат в отрицателни ефекти, които са същите като тези при обичайните системи за управление МИМО.

МИМО MPC управлението е чувствително към изменение на параметрите и може да се влоши качеството му от нежеланите взаимодействия на управляващите променливи, което да доведе до превишаване и грешка в установено състояние когато върху микробната горивна клетка въздействат външни смущения.

Методът за оптимизиране в реално време има способността да помага на контролера на MPC да поддържа автоматично системата в оптимално функционално състояние дори и да се появи неизвестен външен фактор. За регулиране на изходното тегло на MPC контролера се използва метод за оптимизиране в реално време с адаптиране на параметрите въз основа на фиктивен референтен итеративен тунинг (FRIT) и рекурсивен алгоритъм с най-малките квадрати (RLS) с фактор на забравяне (forgetting factor).

Системата за предсказващо управление на адаптирания модел от затворен тип е показана на Фигура 5.8, където $G(z)$ представлява дискретна система за MFC с множествени входове и изходи, $C(z, \theta)$ е MPC контролер, параметризиран с изходното тегло, а θ представлява изходното тегло на MPC контролера, което може да бъде регулирано чрез RLS алгоритъм. Освен това, с $r(k)$, $e(k)$, $u(k)$ и $y(k)$ се обозначават съответно референтният сигнал, грешката на регулиране, входът и изходът на управлението.



Фигура 5.8 Структура на затворената система за автоматично управление

Предсказващият контролер при адаптивния модел, базиращ се на FRIT и RLS, е предназначен за управление на MFC, с цел поддържане на постоянно изходно напрежение при смущения в натоварването и температурите. За да се разработи MPC контролер за микробна горивна клетка с голям брой входове и изходи (МИМО), в проектирането му се прилага базов МИМО модел, определен от следните формули:

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m \Delta u(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k) \end{aligned} \quad (5.67)$$

където $x(k)$, $u(k)$ и $y(k)$ са съответно вътрешното състояние и управляващите променливи и изходните променливи. Променливата на вътрешното състояние $x_m(k)$ се

приема, че е с размерност p . Управляващата променлива $u(k)$ и изходната променлива $y(k)$ се дефинират като 4-измерна и 2-измерна съгласно. Компонентите на управляващия вектор $u(k)$ и вектора на изходната променлива $y(k)$ могат да бъдат представени както следва:

$$u(k) = [Q_a(k), pH_a^{in}(k), Q_c(k), pH_c^{in}(k)]^T \quad (5.68)$$

$$y(k) = [V_{mfc}(k), P_{mfc}(k)]^T \quad (5.69)$$

За да се изрази изменението на изходната променлива $\Delta y(k)$ чрез изменението на променливата на състоянието $\Delta x_m(k)$, се използват следните изрази:

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad (5.70)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (5.71)$$

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k-1) \quad (5.72)$$

Въз основа на уравнението на модела в пространство на състоянията (5.67) и дефинициите на нарастванията, нарастването на променливата на състоянието $\Delta x_m(k+1)$ и изходната променлива $\Delta y(k+1)$ за времето на дискретизация $k+1$ може да бъде изразено чрез следните уравнения.

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (5.73)$$

$$\Delta y(k+1) = C_m \Delta x_m(k+1) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (5.74)$$

Чрез въвеждане на нов вектор на състоянието $x(k) = [\Delta x_m(k)^T \ y(k)^T]^T$, МИМО моделът за предсказващо управление се дефиниран чрез следните формули.

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{pmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{pmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & I_{2 \times 2} \end{pmatrix}}^A \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{pmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{pmatrix}}^B \Delta u(k) \\ y(k) &= \overbrace{\begin{pmatrix} o_m & I_{2 \times 2} \end{pmatrix}}^C \overbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix}}^{x(k)} \end{aligned} \quad (5.75)$$

където $I_{2 \times 2}$ е идентификационната матрица с размери 2×2 , която се използва за описание на броя на изходите, докато o_m е $2 \times p$ нулева матрица. A_m , B_m и C_m са матриците с размери съответно $p \times p$, $p \times 4$ и $2 \times p$.

По този начин предсказаната променлива на състоянието $x(k_i + N_p | k_i)$ и предсказаната изходна променлива $y(k_i + N_p | k_i)$ при време на вземане на проби $k_i + m$ могат да бъдат изведени от дадената текуща информация $x(k_i)$, което става както следва:

$$\begin{aligned}
x(k_i + N_p | k_i) &= A^{N_p} x(k_i) + A^{N_p-1} B \Delta u(k_i) \\
&\quad + A^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) \\
&\quad + \dots + A^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1) \\
y(k_i + N_p | k_i) &= CA^{N_p} x_m(k_i) + CA^{N_p-1} B \Delta u(k_i) \\
&\quad + CA^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) \\
&\quad + \dots + CA^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1)
\end{aligned} \tag{5.76}$$

където N_p е хоризонтът на предсказване, N_c е хоризонтът на управление. Изразът за изхода на системата, може да бъде формулиран по следния начин:

$$Y = DX + \Phi \Delta U \tag{5.77}$$

Тук векторите Y и ΔU са:

$$\Delta U = [\Delta u(k_i)^T, \Delta u(k_i + 1)^T, \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1)^T]^T \tag{5.78}$$

$$Y = [y(k_i + 1 | k_i)^T, y(k_i + 2 | k_i)^T, \dots, y(k_i + N_p | k_i)^T]^T \tag{5.79}$$

а коефициентите D и Φ са дефинирани като:

$$\begin{aligned}
D &= [CA, CA^2, CA^3, \dots, CA^{N_p}]^T \\
\Phi &= \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ CA^{N_p-1} B & CA^{N_p-2} B & CA^{N_p-3} B & \dots & CA^{N_p-N_c} B \end{bmatrix}_{N_p \times N_c}
\end{aligned} \tag{5.80}$$

Целевата функция на проектирания MPC контролер изглежда по следния начин:

$$\begin{aligned}
J &= [R_s - Dx(k_i)]^T [R_s - Dx(k_i)] \\
&\quad - [R_s - Dx(k_i)]^T \Phi (\Phi^T \Phi + \theta I_{N_c \times N_c})^{-1} \Phi^T [R_s - Dx(k_i)]
\end{aligned} \tag{5.81}$$

където θ и R_s са изходното тегло и векторът на зададена точка за MPC контролер.

За да се използва схемата за оптимизация, MPC контролерът може да бъде записан като $C(z, \theta)$, което се параметризира с изходното тегло θ . Законът за управление на MPC контролер в дискретно време може да бъде изразен в съкратената форма:

$$C(z, \theta) = \theta \varphi(z) \tag{5.56}$$

където θ обозначава изходното тегло на MPC контролера, което може да бъде настроено от алгоритъма FRIT, $\varphi(z)$ обозначава управляващия изход на MPC контролера.

За използване на стандартния метод FRIT, входните данни $u_0(k)$ и изходните данни $y_0(k)$ се събират чрез използване на MFC система на управление от затворен тип в определен момент за изчисляване на референтен сигнал $r(k)$, където N е броят

повторения на вземане на проби, а k е от 1 до N . Като се използва параметризираният израз за МРС контролера (5.56) фиктивният референтен сигнал може да бъде изчислен и изразен както следва:

$$\tilde{r}(\theta, k) = C(z, \theta)^{-1} u_0(k) + y_0(k) \quad (5.57)$$

Оттук, референтният изходен сигнал може да се изчисли от проектирания референтен модел $M(z)$ и фиктивния референтен сигнал в уравнение (5.57), както следва:

$$\tilde{y}(\theta, k) = M(z)\tilde{r}(\theta, k) \quad (5.58)$$

където $M(z)$ е проектиран референтен модел, който може да опише входните и изходните характеристики на свършената система от затворен тип.

Индексът на ефективността J може да бъде изчислен от сумата от квадратите на грешките между реалния изход $y_0(k)$ и референтния изход $\tilde{y}(\theta, k)$, т.е.

$$J = \sum_{k=1}^N (y_0(k) - \tilde{y}(\theta, k))^2 \quad (5.59)$$

Изходното тегло θ може да се регулира офлайн чрез минимизиране на критерия за оптималност $J(\theta)$, като той се изразява по следния начин:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N [(1 - M(z))y_0(k) - M(z)C(z, \theta)^{-1} u_0(k)]^2 \quad (5.60)$$

Като един от офлайн оптимизиращите алгоритми, ефективността на управлението на стандартен FRIT се ограничава чрез използване на фиксиран параметър, изчислен офлайн, когато поради нуждите на управлението, неговият приоритет се променя между бързина и прецизност. А при изменения във външното състояние на инсталацията, предварително изчисленият параметър може да загуби ефикасността си за настоящата система, което от своя страна води до влошаване на ефективността на управлението.

За да се подобри способността за идентифициране на параметрите в реално време при процедурата на офлайн оптимизация, адаптивното управление на референтния модел, основащо се на фиктивен референтен итеративен тунинг подход, използва рекурсивен алгоритъм за най-малките квадрати като адаптивен настройващ закон, за да постигне по-висока скорост на сближаване и по-голяма робастност.

Критерият за оптималност J е предназначен да решава оптимизационната задача по отношение на θ , която може да се разглежда като задача на най-малките квадрати, и θ първо се приема, че удовлетворява следното идеално положение:

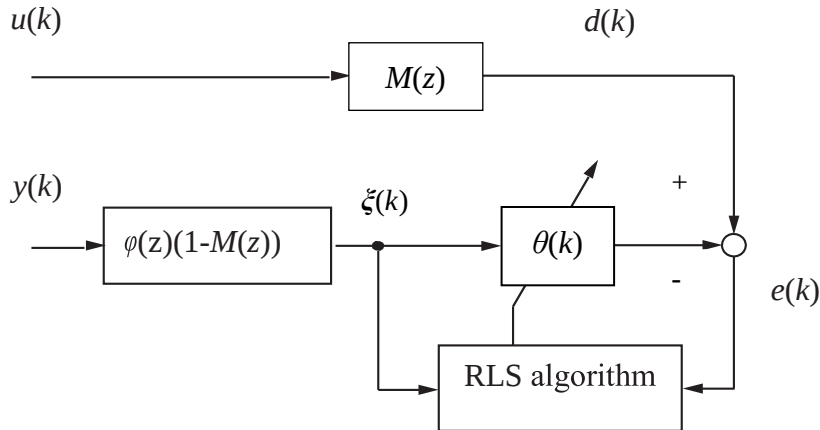
$$y_0(k) = \tilde{y}(\theta, k) \quad (5.61)$$

Използвайки уравненията за МРС контролер, параметризиран по изходно тегло в (5.57) и референтния изходен сигнал $\tilde{y}(\theta, k)$ в (5.58), следното уравнение може да бъде изведено:

$$(1 - M(z))y_0(k) = \frac{M(z)u_0(k)}{\theta\varphi(z)} \quad (5.62)$$

По този начин критерият за оптималност $J(\theta)$ може да се счита като едно свеждане на задачата до задача на най-малките квадрати, така че тя да бъде приведена в съответствие с рекурсивния алгоритъм за най-малките квадрати, като се заменят еднократно данните $u_0(k)$ и $y_0(k)$ с измерените онлайн входни и изходни сигнал $u(k)$ и $y(k)$. Това може да се изрази по следния начин:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N [\theta \varphi(z)(1 - M(z))y(k) - M(z)u(k)]^2 \quad (5.63)$$



Фигура 5.7 Блокова диаграма на алгоритъма на RLS

Механизмът на RLS алгоритъма е илюстриран в детайли на Фигура 5.7, където са приети следните дефиниции за прилагането на RLS алгоритъма.

$$\begin{aligned} \xi(k) &= \varphi(z)(1 - M(z))y(k) \\ d(k) &= M(z)u(k) \end{aligned} \quad (5.64)$$

Алгоритъмът RLS с фактор на забравяне е

$$h(k) = \frac{\xi(k)P(k-1)}{\xi(k)^T P(k-1)\xi(k) + \lambda} \quad (5.65)$$

$$P(k) = \frac{(P(k-1) - h(k)(\xi(k)^T P(k-1)))}{\lambda} \quad (5.66)$$

Алгоритмът RLS с фактор за забравяне има положителен ефект върху параметризирания MPC контролер на изходното тегло, който помага за прилагането на стратегията за контрол на АМРС в микробно-горивната клетъчна система.

За да се провери ефекта на управление на проектираната схема за адаптивно предсказващо управление, бяха проведени симулационни изследвания в среда на Matlab/Simulink. Целта на управление на проектирания адаптивен моделно предсказващ контролер се счита, че управлява MFC, за да поддържа постоянно изходно напрежение при натоварване и температурни смущения в нашата работа.

Скоростите на хранващите потоци и рН-то им са избрани за управляващи променливи в схемата за АМРС. Смущението, появяващо се при бързо натоварване, се

дефинира като покачване външното съпротивление при мигновена реакция от 500Ω до 1000Ω в 750-тия час, а при температура около $303K$ от 750h до 1500h се добавя и постоянно смущение от типа бял шум.

Матриците на идентификационните параметри за модела ММО са

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} 0.7096 & 1.073e-07 & 0.001305 & 4.286e-07 \\ 1.463e-08 & 0.1105 & -1.375e-06 & -0.004115 \\ -0.02564 & 0.000198 & 0.9986 & 0.0006202 \\ -6.738e-06 & 0.4743 & 0.0004962 & 0.9925 \end{pmatrix} \\
 B &= \begin{pmatrix} -0.02971 & -0.007974 & -7.957e-11 & 3.704e-11 \\ -1.429e-10 & -3.836e-11 & -0.001079 & 0.0005023 \\ 0.0004757 & 0.0001277 & -2.031e-07 & 9.453e-08 \\ 8.108e-08 & 2.176e-08 & -0.000848 & 0.0003947 \end{pmatrix} \\
 C &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0.9999 & 0.9999 \\ 0 & 0 & -0.002317 & 0.002317 \end{pmatrix} \\
 D &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.82}$$

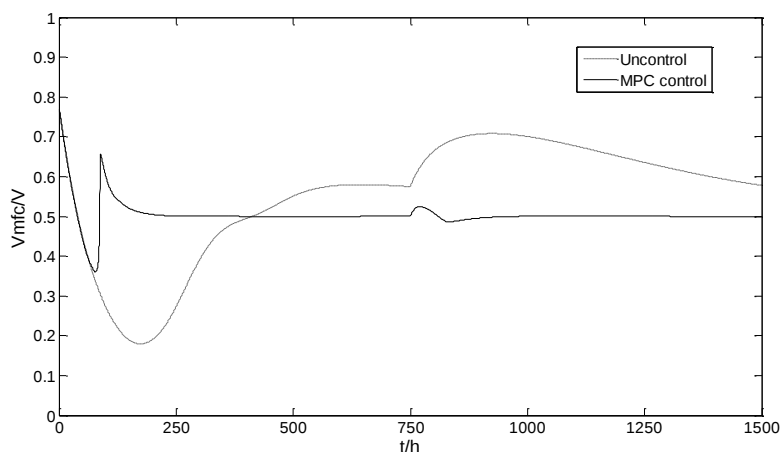
За да се постигне целта за постоянно изходящо напрежение на MFC при външно натоварване и/или температурни смущения, се привежда сравнение между традиционните стратегии за предсказващо управление и адаптивно моделно предсказващо управление на базата на FRIT подход и RLS алгоритъм, като те са проектирани за едновременно управление на четирите управляващи променливи, а именно скоростите на хранване (Q_a , Q_c) и pH на хранващите потоци (pH_a^{in} , pH_c^{in}) в анодната камера и катодната камера.

Когато инсталацията работи с традиционен MPC, хоризонтът на прогнозиране е 20, хоризонтът на управление е 4, интервалът на управление е 0.1h, а изходното тегло се изразява като единична матрица. Ограниченията за манипулираните променливи по отношение скоростите на скоростта на хранване Q_a и Q_c са съответно от 0 до 0.2 и от 0 до 10, което отговаря на изискването за поддържане на достатъчно време за хидравлично задържане в анодната камера на MFC. С оглед на условието за слабо киселинно състояние в анодната камера и слабо алкално състояние в катодната камера за MFC, ограниченията за управляващите променливи pH, условията на хранващия поток pH_a^{in} и pH_c^{in} са съответно от 4 до 7 и от 7 до 10.

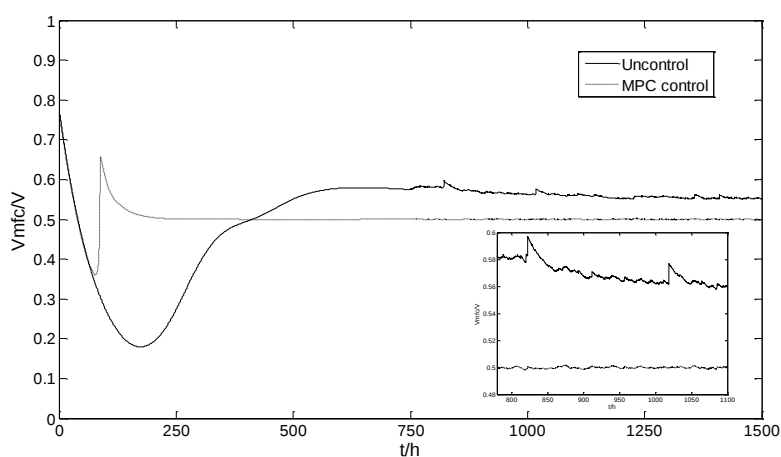
На Фигура 5.9 е приведено сравнение между кривите на изходящия продукт при оригиналната нелинейна MFC система и на нелинейни системи с MPC управление. Провеждат се два теста за смущения: по отношение на външното натоварване и на температурата.

а) Смущения при външното натоварване

б) Температурни смущения



(a) Външни смущения на натоварването



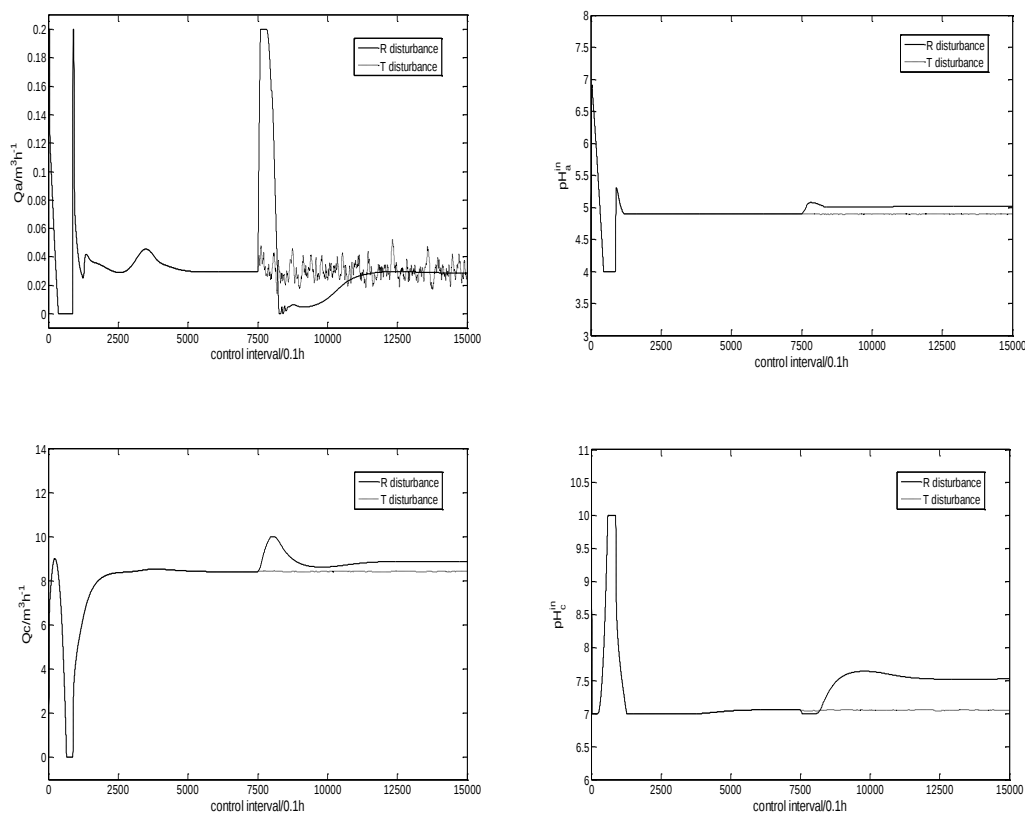
(b) Температурни смущения

Фигура 5.9 Сравнение на кривите между моделно предсказващо управление и неконтролирани (R или T смущения)

Както е видно от в точка а) горе, в случай на смущение, свързано с външното натоварване, при изходното напрежение на системата MFC се наблюдава очевидно изкривяване в точката на същото това външно смущение, след изходното напрежение възстановява равновесното си състояние след период на реакция, който е по-дълъг спрямо този от спрямо началното състояние. За сравнение, в точка б) при температурно смущение, изходното напрежение на MFC системата се движи около стабилното състояние на изходния продукт, като грешките при проследяването от настъпването/ на температурното смущение до края му предизвикват нежеланото явление, наречено осцилация, и това може да се види ясно от детайлната фигура в б).

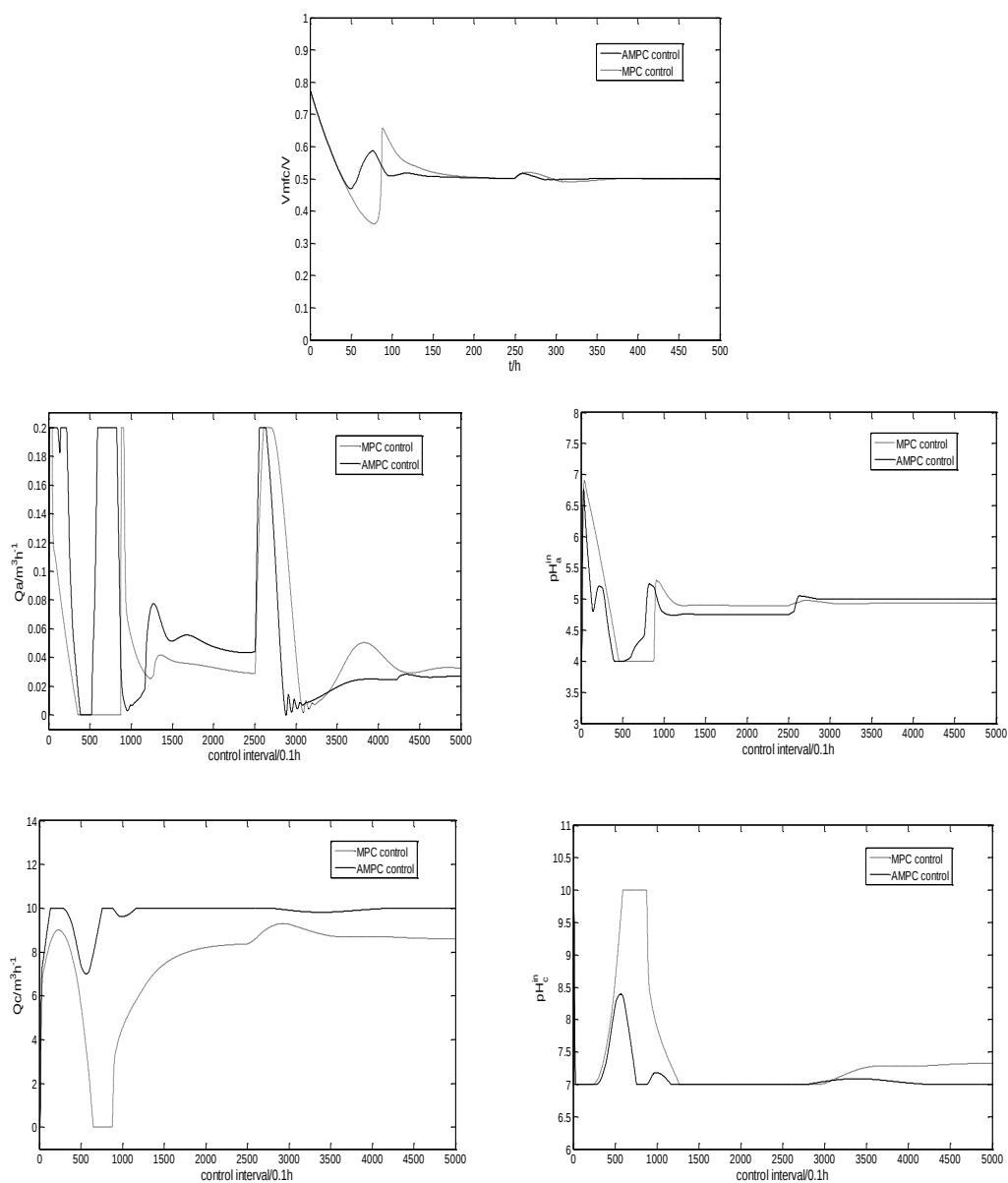
Обаче, когато в системата MFC се използват MPC контролери, изходното напрежение може да проследи за кратко време заданието за регулиране, макар и в системата да е налице смущение, свързано с външното натоварване или с температурата. MFC системата може плавно да влезе в стабилно състояние, благодарение най-вече на

скоростта на захранване на анодната камера, от която в най-голяма степен зависи скоростта на реакция и прецизността на сближаване. Комбинацията от другите три управляващи променливи играе определена роля за управлението, когато скоростта на захранване на анодната камера достигне до ограничението.

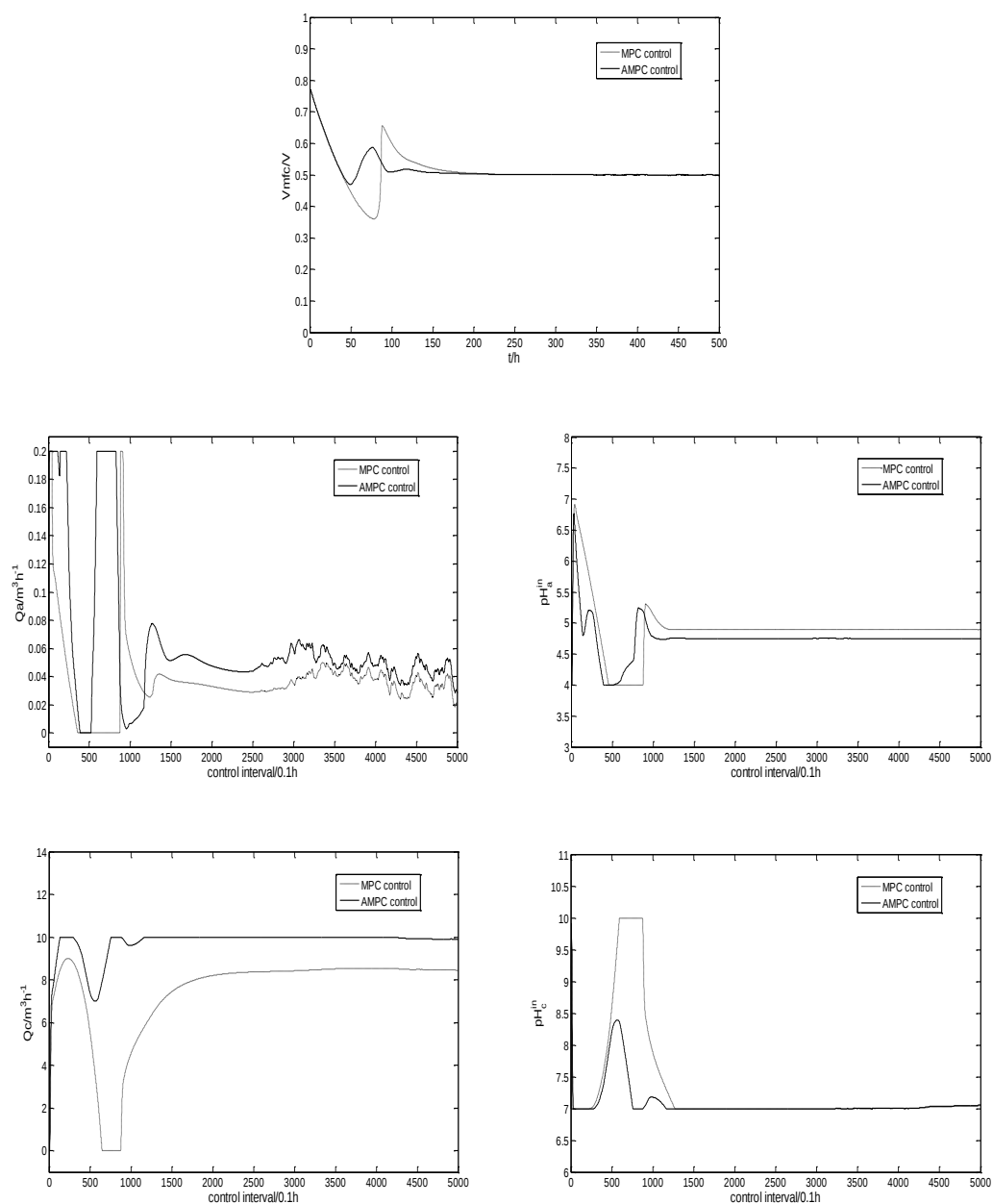


Фигура 5.10 Преходни процеси на MPC управлението (R или T смущения)

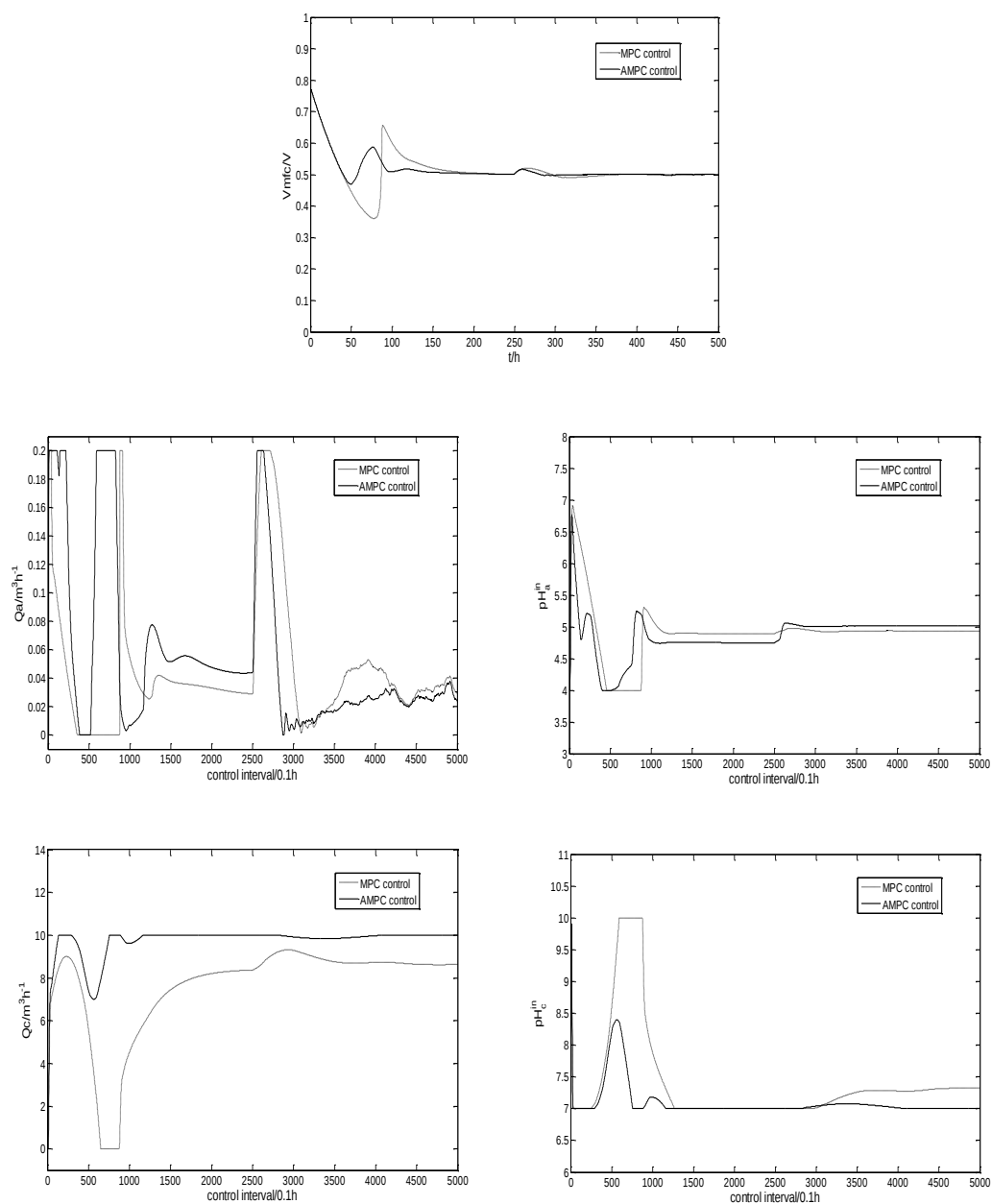
За да покажем валидността и превъзходството на онлайн адаптивната оптимизация за регулиране на изходното тегло при MPC контролера, на Фигура 5.11 и Фигура 5.14 са показани симулационните криви за сравнение между традиционната MPC управлявана нелинейна система и АМРС управлявана нелинейна система. Същите смущения, свързани с външното натоварване, температурата и съчетанията от двете бяха приложени към MFC система за период от 250 часа, което е показано на съответно на Фигура 5.11, Фигура 5.12 и Фигура 5.13. Сравнението на симулационните криви на изходното тегло на MPC контролера по схемата АМРС сред споменатите три смущения е показано на Фигура 5.14.



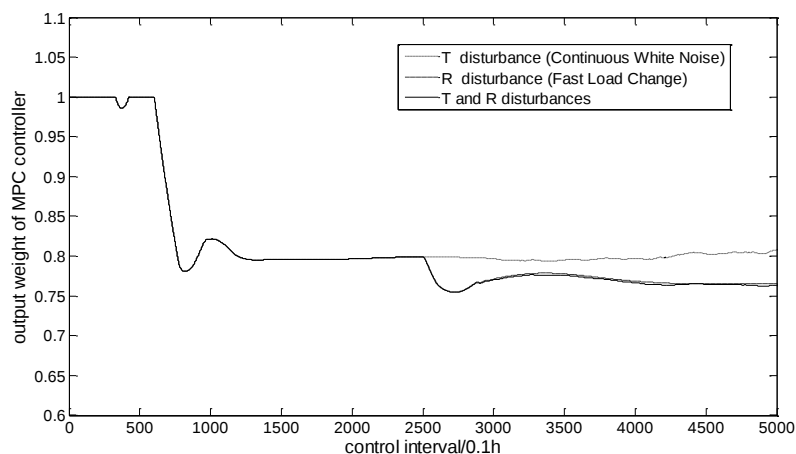
Фигура 5.11 Сравнение на кривите между АМРС и МРС (R смущения)



Фигура 5.12 Сравнение на кривите между АМРС и МРС (Т смущения)



Фигура 5.13 Криви на сравнение между АМРС и МРС (T и R смущения)



Фигура 5.14 Сравнение на кривите на изходното тегло на MPC контролера в схемата AMPC

В сравнение с традиционното MPC управление, AMPC схемата за управление скъсява времето за реакция при интегрирането на MFC системата, води до по-малко пререгулиране и по-предсказуемо поведение в стационарно състояние. Реакциите при управление на четирите управляващи променливи се ускоряват, което се дължи на приноса на онлайн адаптивния оптимизационен алгоритъм. Междувременно онлайн адаптивният оптимизационен алгоритъм изменя изходното тегло на MPC контролера, за да намали управляващите сигнали, така че да се предотврати настъпването на пререгулиране, когато скоростта на захранване на анодната камера достигне ограничението. В допълнение, най-забележителното превъзходство по отношение на стратегията AMPC е, че многовариантната комбинирана стратегия на управление, усилваща способността на главната управляваща променлива, се използва, за да противодейства едновременно и на смущенията от външното натоварване, и на температурните смущения. Проектираната схема AMPC може да управлява системата MFC за проследяване на референтната точката на регулиране с отлична траектория от гледна точка на противодействието срещу влиянието на смущенията.

Изводи към Глава 5

1. Микробната горивна клетка е анализирана като обект за управление и са определени значимите управляващи и изходни променливи.
2. Разработен е моделно предсказващ регулатор за микробна горивна клетка с управляваща променлива рН на анолита. Настройчни параметри на моделно предсказващия алгоритъм са теглата в целевата функция и дължината на предсказващия и управляващия хоризонти.
3. При сравнение със стандартен PID регулатор, моделно предсказващият регулатор няма пререгулиране и има по-добро поведение в установен режим
4. Разработена е и е приложена за микробни горивни клетки нова моделно предсказваща стратегия основаваща се на фиктивен референтен итеративен тунинг (FRIT) и рекурентен метод на най-малките квадрати (RLS).
5. Създадената схема за моделно предсказващо управление е предназначена за конкурентно управление на четири управляващи променливи, включвайки разходите и рН на входните потоци към анодната и катодна камера. Използвайки разработената

управляваща схема системата с микробната горивна клетка има по-бърз преходен процес, малко пререгулиране, добро поведение в установен режим и робастност.

Глава 6 Откриване на повреди и диагностика на микробните горивни клетки

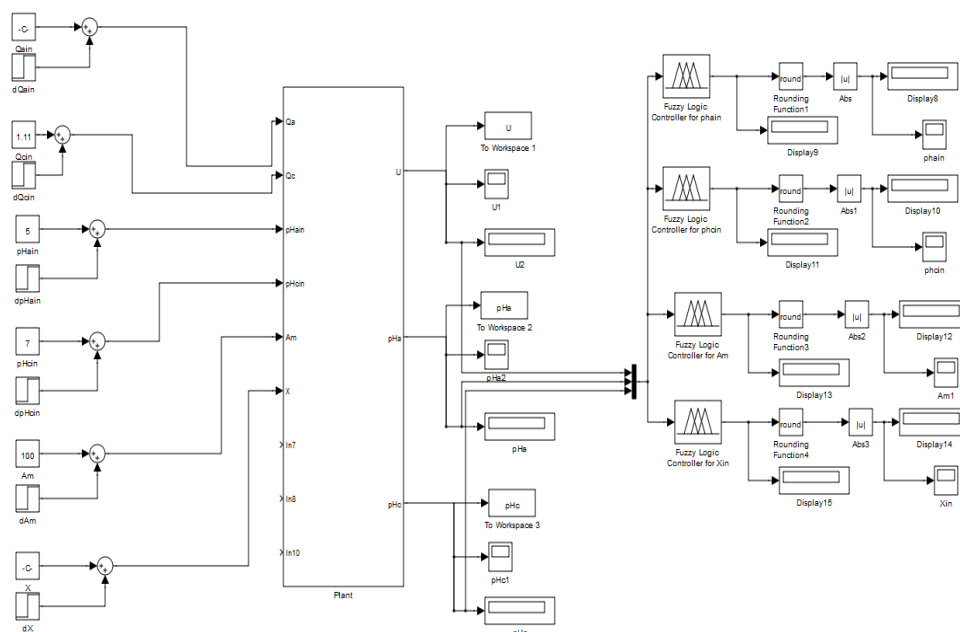
6.1. Адаптивна невронно-размита система за откриване на повреди и диагностика на микробни горивни клетки

При микробните горивни клетки се използва основаващ се на знание диагностичен подход, който се базира на метода на адаптивната невро-размита система за изводи (ANFIS). След това се използва другата ANFIS (adaptive network fuzzy inference system) схема, базирана на алгоритъма за оптимизация в рояк от частици (particle swarm optimization, PSO), за да се подобри диагностичната точност.

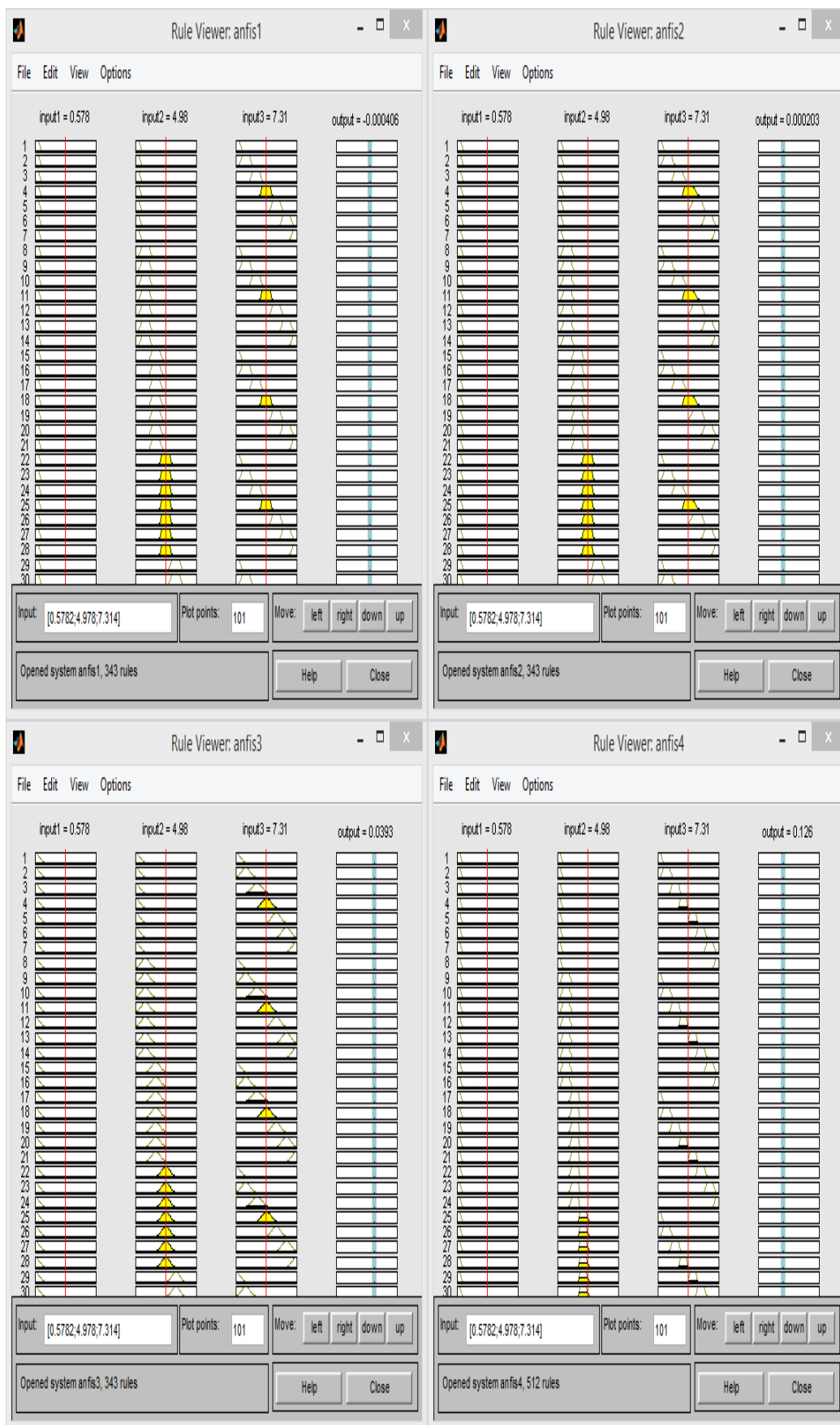
(I) Базирано на знание откриване и изолиране на повреди при микробни горивни клетки въз основа на ANFIS

Целта на диагностичния подход, основаващ се на знание, е да се открият и изолират различните повреди, които могат да възникнат в системата. В тази схема на FDI (откриване и изолиране на повреди (fault detection and isolation), основаваща се на ANFIS, се вземат предвид четири вида грешки, а именно стойността на pH в хранящия поток на анодното отделение $pH_{a_{in}}$, стойността на pH в хранящия поток на катодното отделение $pH_{c_{in}}$, наличната площ на мембраната за протонен обмен A_m и концентрацията на бактерии при вливане в анодното отделение X_{in} .

За да се провери ефектът на конструираната схема за откриване и изолиране на неизправности, се извършва симулация в платформата на Matlab/Simulink. За целите на съвременното откриване на повреди, изходното напрежение и текущите стойности на pH в двете камери се приемат за симптоми, с което се избягва удължаването на времето за диагностика. В структурата на системата за откриване и изолиране на неизправности се използват четири успоредни ANFIS системи, както е показано на фигура 6.2.



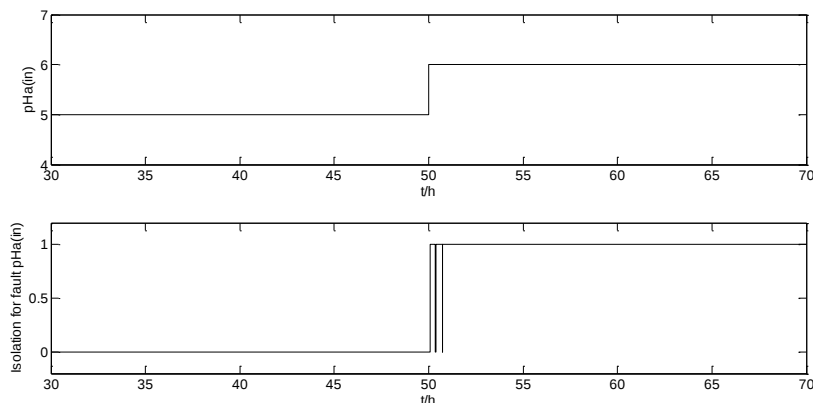
Фигура 6.2 Система за FDI с четири паралелни ANFIS системи



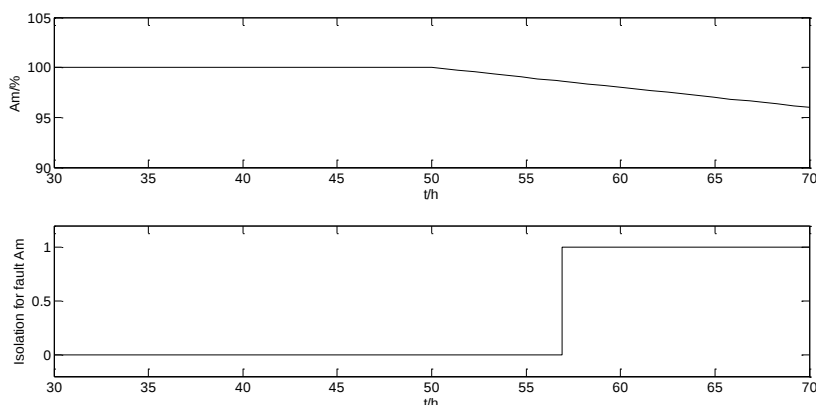
Фигура 6.3 Правилата на четири паралелни ANFIS системи

Правилата при четири паралелни ANFIS системи са показани на Фигура 6.3. Както се вижда от тази фигура, всяка ANFIS система има 3 входа и 1 изход. За повредите при pHa_{in} , pHc_{in} и A_m има 343 правила, докато за повредите при X_{in} има 512 правила. Причината е, че за различните повреди има различни възлови точки.

С цел тестване на способността за откриване и изолиране на неизправности на проектираната ANFIS FDI система се прилагат два вида външни смущения на pHa_{in} и A_m . pHa_{in} се променя от 5 до 6 в 50-тия час. Освен това, A_m постепенно се променя от 100 процента на 90 процента от 50 часа до 100 часа. Резултатите са показани на фигури 6.4 и 6.5.



Фигура 6.4 Резултатът от системата ANFIS FDI при външни смущения на pHa_{in}



Фигура 6.5 Резултатът от системата ANFIS FDI при външно смущение на A_m

Фигури 6.4 и 6.5 са показателни за някои явления. ANFIS FDI схемата позволява на системата да открие и изолира на неизправности за кратко време. За pHa_{in} смущение със стъпка от 5 до 6, грешката може да бъде открита и изолирана след 1 час. За смущение, понижаващо A_m постепенно от 100 процента до 90 процента, повредата може да бъде открита и изолирана след 7 часа по времето, когато A_m площта достигне до 98 процента.

Използвайки проектираната схема ANFIS FDI, системата MFC може да интегрира способността за откриване и изолиране на грешки с по-бърза реакция и по-кратко забавяне. При различни видове повреди, подходящата схема ANFIS FDI може да получи задоволителни резултати за откриване на повреди, както и за изолирането им, за да се поддържа стабилна работата на микробните горивни клетки.

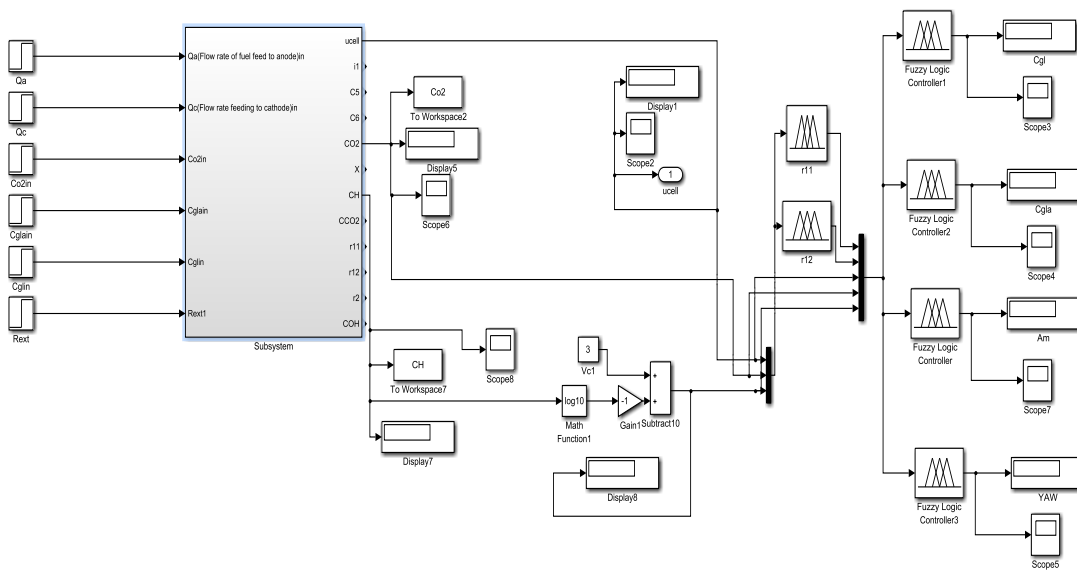
(II) Откриване и разпознаване на повреди в микробни горивни клетки въз основа на знание въз основа на PSO-ANFIS

В някои ситуации в анодните реакции участва смес от няколко субстрата, което създава трудности при проектирането на схемата за откриване и разпознаване на повреди при микробните горивни клетки. Причината е, че консумацията на различни субстрати следва съответните скорости на реакция. По този начин в схемата за откриване и идентифициране на неизправности (FDI) за този тип MFC трябва да се обърне внимание на различните електрохимични реакции в анодното отделение.

Оптимизацията в рояк от частици (PSO) е вид подход за оптимизиране на точността на обучение чрез търсене. Предложеният подход за диагностика на грешки се основава на съчетание от ANFIS и PSO, където стратегията за PSO е предназначена за постигане на по-малка прогнозирана грешка от ANFIS чрез настройване на функциите за принадлежност. При една сложна система, каквато е микробната горивна клетка, повредите са още по-трудни за улавяне от симптомите, тъй като неопределените параметри на процеса, в това число скоростта на реакция, играят междинна роля между входовете и изходите. За да се преодолее тази трудност, за прогнозиране на скоростите на реакция, свързани с непроменените параметри в процеса на обучение се използва технологията за софтсенсинг (soft sensing), базирана на ANFIS. Процесите на обучение използват схема ANFIS, която интегрира алгоритъма на PSO за обучение по данни.

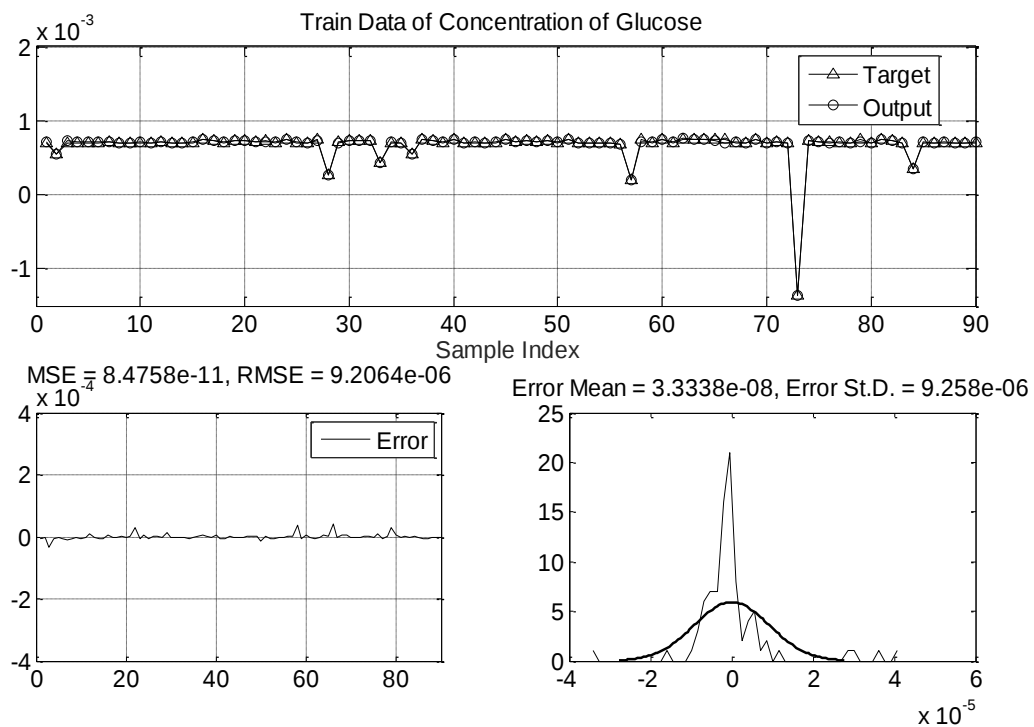
В тази схема за откриване и идентифициране на повреди се разглеждат четири вида грешки, касаещи съответно концентрацията на глюкоза при вливането в анодното отделение Cgl_{in} , концентрацията на глутаминова киселина при вливането в анодното отделение Cgl_{in} , наличната площ на мембраната за протонен обмен A_m и бактериалния добив при вливането в анодното отделение Y_{AW} .

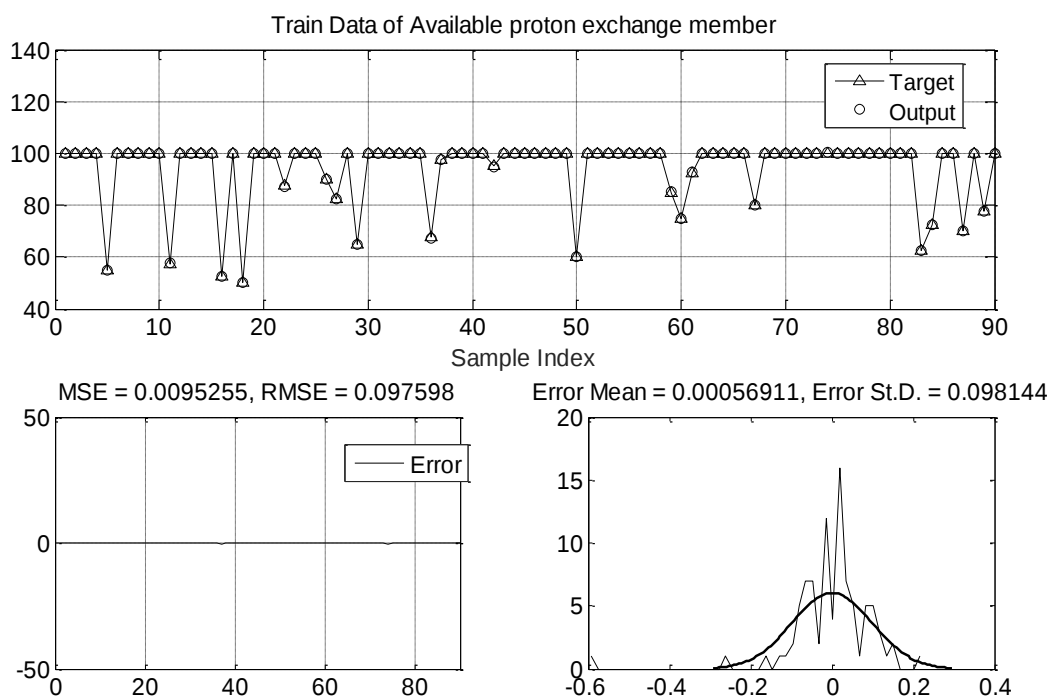
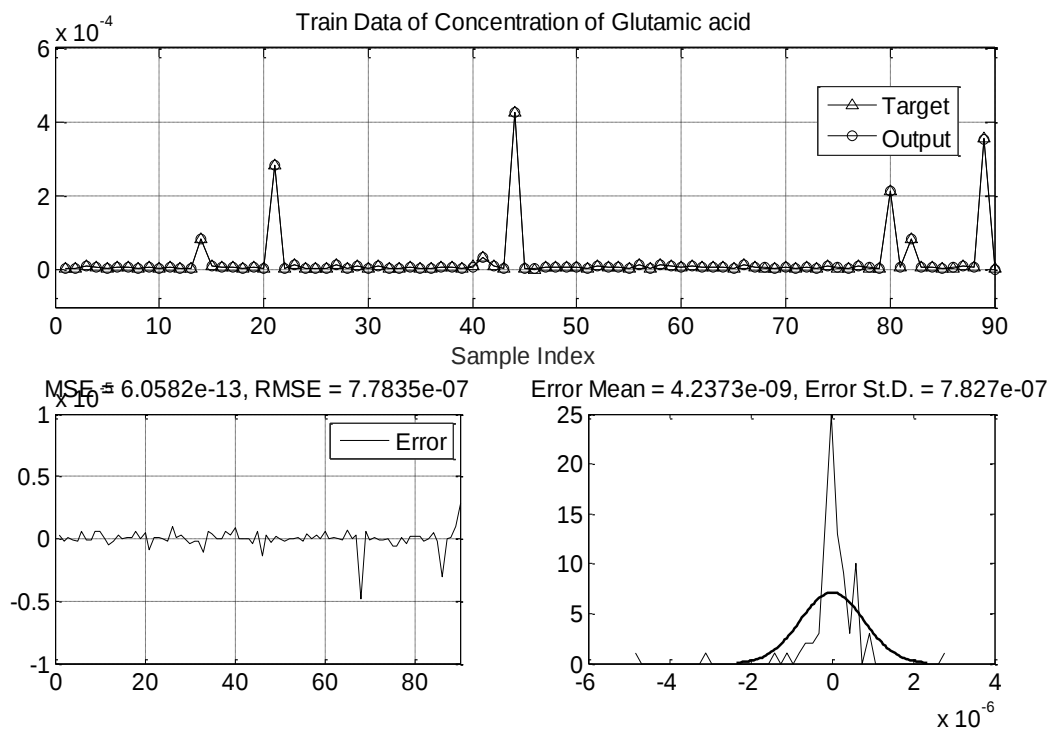
За да се провери ефективността на така конструираната схема за откриване и разпознаване на неизправности, в платформата на Matlab/Simulink беше проведена симулация. С цел своевременно идентифициране на повредите, изходното напрежение на онлайн измеримите параметри, текущата стойност на рН в анодната камера и концентрацията на кислород се считат за симптоми, което позволява съкращаване навремето за диагностика. В първата схема структурата на системата за откриване и разпознаване на неизправности използва четири успоредни ANFIS системи като идентификационни секции и две системи ANFIS като секции като софтуерни сензори, както е показано на Фигура 6.8.

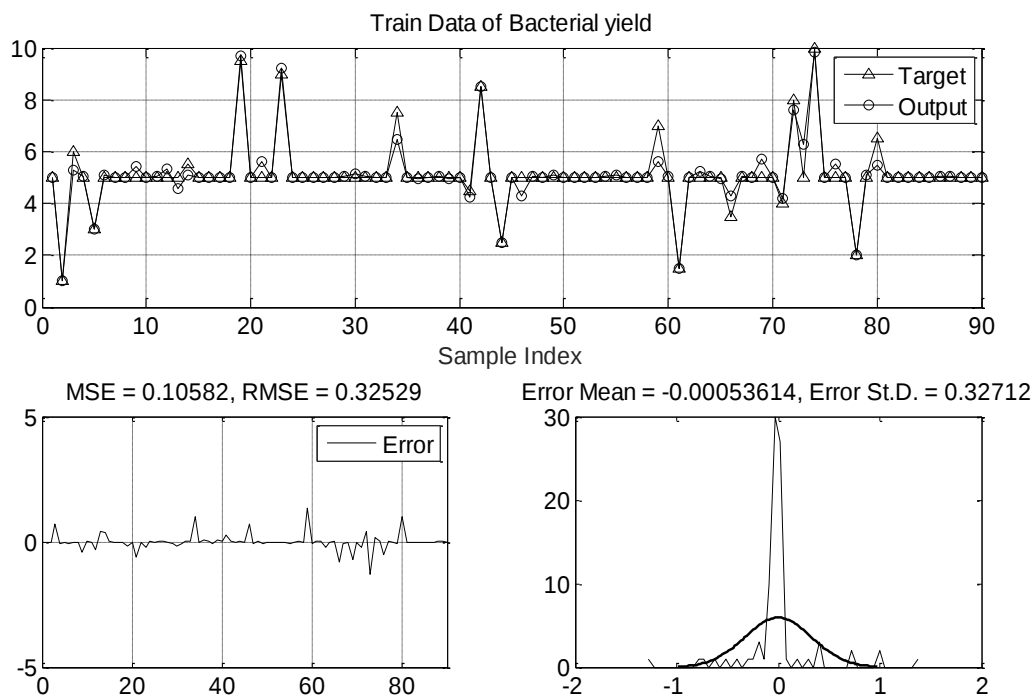


Фигура 6.8 Системата FDI с две шест паралелни ANFIS системи

Симулационните резултати от обучението за данните са показани на Фигура 6.7.





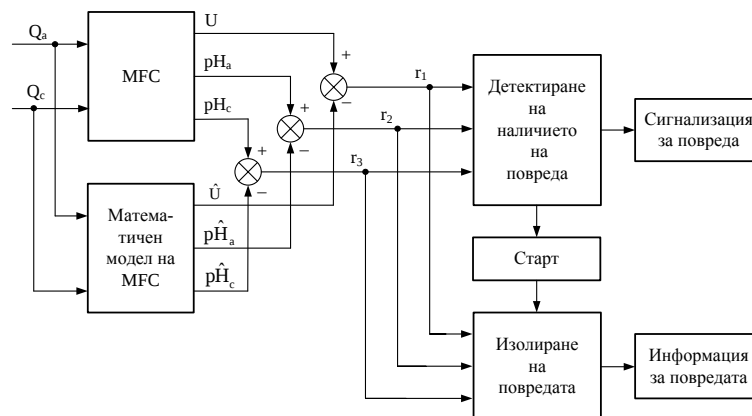


Фигура 6.9 Обучение в данни за повреди в системата MFC

Фигура 6.9 е показателна за някои явления. FDI схемата позволява MFC системата да интегрира способностите за откриване и за идентифициране на грешки. Резултатите от симулацията показват, че изходният продукт на проектираната FDI схема е сравнително близък до първоначалните данни. Чрез използването на проектираната FDI схема въз основа на PSO-ANFIS, MFC системата може да интегрира способностите за откриване и за разпознаване на повреди с малки отклонения спрямо прогнозните резултати. При различни видове повреди, при наличие на неизмерими параметри на процеса, схемата на FDI въз основа на PSO-ANFIS може да даде задоволителни резултати за откриване на повредите, както и за идентифициране на текущите данни за повреди, така че да бъде запазено стабилната функционалност на микробните горивни клетки.

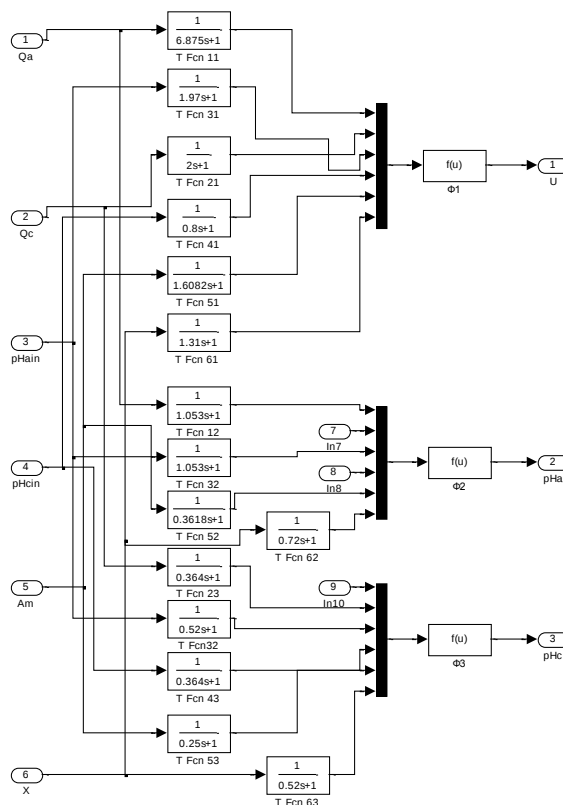
6.2. Моделно базирана система за откриване на повреди и диагностика на микробни горивни клетки

Разработена е моделно базирана система за откриване на повреди и диагностика на микробни горивни клетки. Системата е предназначена за on-line работа. Методът се основава на модификация на метод на чувствителността, при което се използва действителната и теоретичната чувствителност на остатъците, представляващи разлика между текущите стойности на симптомите и предсказаните по математичния модел. Симптоми за целите на диагностиката са изходящото напрежение U , pH_a в анодната камера и pH_c в катодната камера. Схемата на системата за откриване на повреди и диагностика в микробните горивни клетки е показана на Фиг.6.11



Фигура 6.11 Схема на системата за откриване на повреди и диагностика

Q_a и Q_c са разходите на входните потоци съответно на анолит и католит. С r_1, r_2, r_3 са означени остатъците между измерените стойности на симптомите и предсказаните им стойности по математичния модел. Разработени са два блока, съответно за детектиране на наличието на повреди и за изолване на повредата. При откриване на повреда се стартира блокът за изолване на повредата. Блоковете за сигнализация на повреда и информация за повредата са интерфейси за комуникация с оператор. Блоквата схема на математичния модел е представена на Фиг. 6.10. Структурата му съответства модела на Винер – последователно свързани линейни динамични звена и нелинейни статични звена.



Фигура 6.10 Структура на математичния модел

Параметрите за диагностика са: pH_{ain} и pH_{cin} съответно на входните разтвори на анолита и католита, ефективната площ на мембраната A_m и концентрацията на микроорганизми X . Параметрите са неизмерими. Повредите, свързани тях или със системите, които ги управляват са означени както следва f_1, f_2, f_3, f_4 . За детектиране на повреда се използват гранични стойности

$$\text{if } |r_1(k)| \leq r_1^* \text{ and } |r_2(k)| \leq r_2^* \text{ and } |r_3(k)| \leq r_3^* \text{ then all is OK} \quad (6.24)$$

Теоретичната относителна чувствителност се изчислява на базата на симулационни експерименти по израза

$$S_{r_1 f_j}^{t,rel} = \frac{r_i^t}{r_1^t} \quad (6.25)$$

а действителната относителна чувствителност се изчислява на базата на on-line измервания

$$S_{r_1 f_j}^{a,rel} = \frac{\Delta r_i(k)}{\Delta r_1(k)} \quad (6.26)$$

За всяка очаквана повреда f_j се изчислява Евклидовото разстояние d_{f_i} по израза

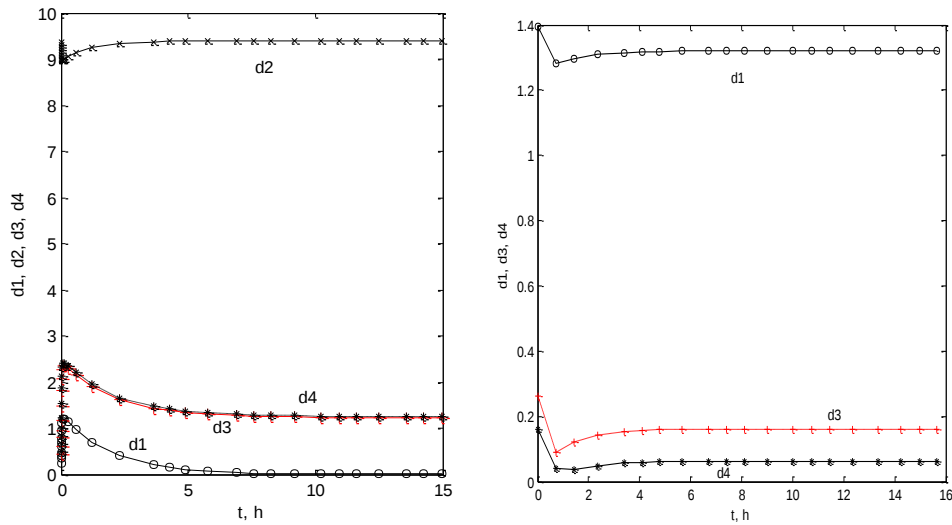
$$d_{f_i} = \sqrt{(S_{r_2 f_j}^{a,rel} - S_{r_2 f_j}^{t,rel})^2 + \dots + (S_{r_m f_j}^{a,rel} - S_{r_m f_j}^{t,rel})^2} \quad (6.19)$$

Получава се вектор с Евклидови разстояния, съответстващи на възможните повреди

$$d = [d_{f_1}(k), d_{f_2}(k), \dots, d_{f_n}(k)] \quad (6.20)$$

Евклидовото разстояние с минимална стойност е показател за възникване на съответстващата му повреда f_j

На Фиг.6.14 са представени резултати от изследванията при аномалии в $pH_{ain}(f_1)$ и $X(f_4)$.



Фигура 6.14 Евклидови разстояния за различни повреди

От Фиг.6.14 се вижда, че при конкретна повреда съответното и Евклидово разстояние е с най-малка стойност. В първият случай това е d_1 , а във втория d_4

Изводи към глава 6

1.Анализирани са елементите на микробна горивна клетка и нейните подсистеми от гледна точка на откриването на повреди и изолирането им.

2.На базата на адаптивна невронно-размита система за изводи (ANFIS) е разработена система за откриване на повреди и изолирането им за микробна горивна клетка. За да се класифицират различните видове повреди въз основа на измерване на симптомите, в структурата на системата за откриване на повреди и изолирането им са включени паралелно четири ANFIS системи.

3.На базата на ANFIS е създадена система за откриване на повреди и идентификацията им, чрез използване на биоинспириран метод на рояците за оптимизация за обучение на правилата в ANFIS. Оптимизацията по метода на рояците може да извлече правилата в ANFIS с цел постигане на висока чувствителност.

4.Чрез използване на разработената система за откриване на повреди и идентификация, базирана на метода на рояците в микробните клетки могат да бъдат открити повреди с малки грешки и като резултат микробната горивна клетка да работи устойчиво.

5.Разработена е система за онлайн моделно базирана диагностика на микробна горивна клетка. За целта е разработен нелинеен динамичен модел на клетката със структура съответстваща на модела на Винер.

6.Изолирането на повредите се извършва на базата на остатъците между измерените стойности на симптомите и предсказаните им стойности по модела и следващ анализ на чувствителността. Разработени са блокове за откриване и изолиране на повреди

Общи изводи

Научните изследвания в тази дисертационна работа са насочени към микробните горивни клетки (MFC).

Едно от най-важните предимства на MFC е тяхната способност за едновременно пречистване на отпадъчните води и директно добиване на електрическа енергия от органичните вещества в отпадъчните води. От тази гледна точка MFC са обещаваща алтернатива за електроенергия от възобновяемите източници.

Възможностите за управление и диагностика на микробните горивни клетки, които биват разглеждани чрез използване съвременни методи, включително системи за изкуствен интелект, все още не са проучени в достатъчна степен. В това направление са насочени и основните изследователски усилия.

За целите на изследването са разработени лабораторни микробни горивни клетки за пречистване на отпадъчни води и производство на електроенергия. Създадена бе система за измервания и събиране на данни за MFC. С тази система от лабораторен мащаб могат се правят експериментални изследвания за влиянието на оперативните режими върху производството на електроенергия, пречистването на отпадъчните води и по-специално въздействието на рН върху процеса.

В Matlab/Simulink среда са създадени и изследвани три вида симулационни модели за микробни горивни клетки с непрекъснато действие. Тези модели са предназначени за изследвания, свързани с контролни и диагностични системи.

За микробните горивни клетки са разработени и изследвани са адаптивното размито управление, SISO моделно предсказващо управление (MPC) и MIMO адаптивно моделно предсказващо управление, основаваща се на фиктивен референтен итеративен тунинг (FRIT) и рекурентен метод на най-малките квадрати (RLS), предназначена за микробни горивни клетки. MPC системата е сравнена с конвенционален PID контролер. MPC контролерът притежава по-висока точност и по-добро поведение в установен режим

Създадени и изследвани са системи за откриване и диагностика на повреди при MFC на базата на ANFIS и PSO-ANFIS. Системата за откриване и изолиране на неизправности въз основа на ANFIS може да открие и изолира бързо повреди. Системата за откриване и идентифициране на неизправности въз основа на PSO-ANFIS може да идентифицира текущите стойности на грешките с голяма точност.

Разработена е моделно базирана система за откриване на повреди и изолирането им за MFC на базата на анализ на чувствителността.

Разработените и изследвани са съвременни системи за управление и диагностични процедури за микробните горивни клетки, които могат да бъдат пренесени върху други лабораторни, пилотни и индустриални технологични обекти в областта на химията и опазването на околната среда.

Приноси на дисертационния труд

1.Разработена е лабораторна микробна горивна клетка за пречистване на отпадъчни води и генериране на електричество. Горивна клетка е комплектувана с автоматична система за измерване и събиране на данни. Проведени са голям брой експериментални изследвания.

2.Създадени са и са изследвани три вида симулационни модела на двукамерна микробна горивна клетка. Първият симулационен модел е за един субстрат, вторият е със специален блок за включване на рН на анодния поток като управляваща променлива и третият - за клетка с два различни субстрата - глюкоза и глутаминова киселина.

3.Разработен е адаптивен размит контролер, който има възможност за самонастройка на размит параметър. Контролерът може да поддържа постоянно напрежение на изхода на микробната горивна клетка даже и в условия на бързо изменение на натоварването и има много добро поведение в установен режим.

4.Създадена е нова MIMO моделно предсказваща стратегия, основаваща се на фиктивен референтен итеративен тунинг (FRIT) и рекурентен метод на най-малките квадрати (RLS), предназначена за конкурентно управление на четири управляващи променливи на микробни горивни клетки. Използвайки разработената управляваща схема, системата с микробната горивна клетка има по-бърз преходен процес, малко пререгулиране, добро поведение в установен режим.

5.На базата на адаптивна невронно-размита система за изводи (ANFIS) е разработена система за откриване на повреди и изолирането им за микробна горивна клетка. За да се класифицират различните видове повреди въз основа на измерване на симптомите, в

структурата на системата за откриване на повреди и изолирането им са включени паралелно четири ANFIS системи.

6. На базата на ANFIS е създадена система за откриване на повреди и идентификацията им, чрез използване на биоинспириран метод на рояците за оптимизация за обучение на правилата в ANFIS. Оптимизацията по метода на рояците може да извлече правилата в ANFIS с цел постигане на висока чувствителност.

7. Разработена е система за онлайн моделно базирана диагностика на микробна горивна клетка. За целта е създаден нелинеен динамичен модел на клетката със структура съответстваща на модела на Винер. Изолирането на повредите се извършва на базата на остатъците между измерените стойности на симптомите и предсказаните им стойности по модела и следващ анализ на чувствителността. Разработени са блокове за откриване и изолиране на повреди

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

A1.Fan,L., Chong Li, K.Boshnakov, Performance Improvement of a Microbial Fuel Cell Based on Adaptive Fuzzy Control, Pak. J. Pharm. Sci., Vol.27, No.3, May 2014, pp.685-690 (IF=1.11 (2014г.).

A2.Fan,L., Chong Li, K.Boshnakov, Performance Comparison of Three Different Controllers for Proton Exchange Membrane Fuel Cell, The Open Fuels & Energy Science Journal, 2015, Volume 8, pp.115-122 (SJR=0.158 (2015).

A3.Li, Chong, K.Boshnakov, L.Fan, Voltage Control of Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment, *Science, Engineering & Education*, 1, (1), 2016, 43-52.

A4.Boshnakov, K., Chong Li, L. Fan, Моделно-основаваща се диагностика на повреди в микробиологични горивни клетки, Proceedings of the International Conference Automatics and Informatics'2016, October 4-5, 2016, Sofia, Bulgaria, pp. 271-276.

A5.Li, Chong, Diagnosis of Microbial Fuel Cells on the Base of ANFIS, Сборник на Националната научно-техническа конференция с международно участие "Автоматизация в минната индустрия и металургията", БУЛКАМК'2016, 10-11 ноември 2016, София, стр. 104-109

A6.Li, Chong, K.Boshnakov, L.Fan, Sustainable Voltage Reutilization of a Microbial Fuel Cell of a Low Organic Load Using pH Buffer Solution Injection, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 52, 1, 2017, 66 – 74 (SJR=0.194(2015).