

а для випадку двофазного замикання на нейтраль

$$2u_0 \cos \gamma_r = r_2 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - j\omega \Psi_q; \quad (26)$$

$$-2u_0 \sin \gamma_r = r_2 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - j\omega \Psi_d; \quad (27)$$

$$\Psi_d = x_0 i_d + x_{af} i_{fd} + x_{a1} i_{1d} + \dots + x_{a3} i_{3d}; \quad (28)$$

$$\Psi_q = x_0 i_q + x_{af} i_{fq} + x_{a1} i_{1q} + \dots + x_{a3} i_{3q}. \quad (29)$$

Для врахування неметалевого замикання необхідно прийняти $r_{кз} = r + r_3$, $x_{кз} = x + x_3$, де x_3 , r_3 – параметри опору короткого замикання, x , r – параметри опору статора.

Висновки. На основі відомого підходу отримано рівняння стану асинхронізованого генератора в режимі одно- та двофазного короткого замикання на нейтраль.

1. Міняйло А.С., Пыльпюк Р.В., Покровский К.Б., Шматюк Н.П. Технично-економическая ефективность применения на электростанциях асинхронного режима асинхронизированого турбогенератора // Изв. вузов. Энергетика. – Минск, 1991. – № 11. – С. 117–127. 2. Міняйло О.С., Покровський К. Струми короткого замикання асинхронізованого турбогенератора в різних режимах роботи // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – № 418: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 127–131. 3. Міняйло О.С., Покровський К.Б., Маврін О.І., Мальцева Н.Г. Диференційні рівняння стану асинхронізованого генератора в режимі двофазного замикання // Тез. доп. до 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці”. – Львів, 17–20 жовтня 2007. 4. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.

УДК 621.365.2; 621.311.1

Р.Я. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОГО КОЛА ДУГОВОЇ ПЕЧІ

© Паранчук Р.Я., 2009

Запропоновано математичну та цифрову моделі нейромережевої системи неперервного вимірювання параметрів силового кола дугової сталеплавильної печі. Подано результати моделювання процесу ідентифікації параметрів її силового кола.

Mathematical and digital model of neural network based system for continuous measuring of power circuit parameters in arc steel-melting furnace are offered. The results of simulation of power circuit parameters measuring process are given.

Вступ. Проблема підвищення електротехнологічної ефективності керування режимами плавлення в дугових сталеплавильних печах (ДСП) трифазного струму, зокрема зниження енергоємності металопродукції, поліпшення показників електромагнітної сумісності та екологічної ефективності є пріоритетною для електрометалургійної галузі України. Ефективним і дієвим підходом у вирішенні окресленої вище проблеми є розроблення високоефективних систем

керування та швидкодіяного регулювання координат електричного режиму (ЕР) і реалізація на основі цього багатокритеріальних стратегій адаптивного оптимального керування режимами сталеплавлення в ДСП. Суттєвою перешкодою на шляху успішного вирішення окресленої вище проблеми є стохастична нестабільність параметрів елементів силового кола (короткої мережі) дугової печі, що вимагає реалізації неперервної адаптації багатокомпонентного вектора оптимального керування системи до зазначених вище параметричних змін.

Формулювання мети досліджень. Тому для адаптації процесу керування до вказаних параметричних змін необхідно розробити схемні та алгоритмічні рішення для оперативної ідентифікації вказаних параметрів елементів силового кола (СК) ДСП. Стохастичний нестационарний і нелінійний характер процесу флуктуацій значень цих параметрів (власних і взаємних індуктивностей та активних опорів) у широких межах і за різних причин значно ускладнює процес їх вимірювання. Низка специфічних конструктивних та технологічних факторів не дає змоги реалізувати пряме їх вимірювання упродовж плавки. Реалізувати процес оперативної їх ідентифікації і з необхідною точністю, що необхідно для вирішення задач синтезу оптимального керування та експлуатаційного контролю напруг на дугах, можна лише на основі моделей, що адекватні до природи процесів, що протікають у силовому колі дугової печі. Обґрунтування такої моделі і дослідження її ефективності є предметом даного дослідження.

Аналіз відомих рішень. Відомі схеми та алгоритми функціонування аналогових [1] і аналого-цифрових [2] пристроїв для експлуатаційного контролю параметрів силового кола ДСП ґрунтуються на основі детермінованих моделей процесів. У запропонованих в [1] пристроях для експлуатаційного вимірювання напруг на дугах приймається, що значення власних та взаємних індуктивностей та активних опорів елементів короткої мережі дугової печі є сталими. Тому точність вимірювання напруг на дугах за такого припущення є невисокою. Описаний в [2] алгоритм для експлуатаційного контролю параметрів елементів силового кола ДСП ґрунтується на детермінованій моделі процесів, яка не є адекватною до реальної стохастичної моделі процесів. Невисока точність такого експлуатаційного контролю параметрів елементів короткої мережі печі спричинена невідповідністю типу моделі ідентифікації параметрів і типу моделі процесів у силовому колі. Зважаючи на динамічний, стохастичний, нестационарний та несиметричний характер зміни параметрів дугових розрядів і спричинюваний цим відповідний характер зміни параметрів елементів силового кола трифазної системи дуг без нульового провідника, а також зважаючи на відсутність точних математичних моделей силового трифазного кола з дугами без нульового провідника та кіл вимірювання напруг дуг, доцільним підходом для підвищення точності експлуатаційного контролю параметрів елементів силового кола є використання нейромережових принципів ідентифікації [3], застосування яких є доцільним саме за причини стохастичного нестационарного характеру процесів у силовому колі ДСП.

Виклад основного матеріалу. Дослідження ефективності використання нейромережових принципів для ідентифікації параметрів силового кола ДСП і реалізації на основі цього експлуатаційного контролю напруг на дугах на різних технологічних стадіях плавлення (за різних параметрів стохастичних характеристик збурень у плавильному просторі і дугових проміжках) доцільно виконати на цифровій моделі силового кола та моделі алгоритму нейромережової підсистеми ідентифікації параметрів його елементів.

Найбільше у силовому колі змінюються значення взаємних індуктивностей гнучких кабелів, що утворюють петлі, які компенсують переміщення жорстких шинопроводів у процесі регулювання довжин дуг і нахилання корпусу печі. Значна статична нерівномірність взаємних індуктивностей L_{AB} , L_{BC} , L_{CA} гнучких та жорстких шинопроводів і їх випадкові флуктуації при змінах взаємного положення жорстких та гнучких шинопроводів призводять до виникнення ефектів “дикої” та “мертвої” фази, що негативно впливає на значення техніко-економічних показників ДСП, призводить до нерівномірності нагрівання шихти та розплаву по периметру і об’єму, а також до нерівномірності

зношування футерівки дугової печі. Розрізняють динамічну і статичну несиметрію взаємних індуктивностей, що спричинюються геометричною несиметрією конструкції короткої мережі (силового кола) ДСП. Найбільше значення, несиметрію та амплітуду зміни мають, як сказано вище, взаємні індуктивності гнучких та жорстких шинопроводів, що переміщуються разом з рукавами електродотримачів. У меншій мірі змінюються власні індуктивності L_A, L_B, L_C і активні опори R_A, R_B, R_C елементів силового кола. Отож для точної компенсації зазначених змін індуктивностей та активних опорів у кожному фазному каналі вимірювання напруг на дугах [1] необхідно оперативно відслідковувати процеси їх зміни і адекватно враховувати їх ідентифіковані значення у моделях розрахунку напруг на дугах.

Для отримання вищої точності контролю параметрів елементів СК печі і для спрощення процесу навчання, ідентифікації і реалізації алгоритму нейронної мережі (НМ), запропоновано, як варіант, використовувати три нейронні мережі для ідентифікації кожної групи параметрів: L_{AB}, L_{BC}, L_{CA} ; L_A, L_B, L_C і R_A, R_B, R_C відповідно. На входи кожної з нейронних мереж подаються лише ті сигнали координат режимів, процеси зміни яких є найбільше корельовані (пов'язані) з процесами зміни відповідної групи параметрів елементів СК дугової печі, тобто сигнали, зміни яких відчутних впливають на контрольований на виході нейронної мережі параметр.

Дослідження ефективності та точності нейромережевої ідентифікації динамічно змінюваних параметрів силового кола ДСП та неперервного розрахунку напруг на дугах з використанням отриманих їх значень, а також дослідження ефективності запропонованої процедури синтезу матриці синаптичних зв'язків (процедури навчання) та тестування кожної з нейронних мереж виконані на створеній цифровій моделі СК печі та алгоритму нейромережевої ідентифікації її параметрів. Функціональну блок-схему розробленої математичної та цифрової моделі електричних режимів силового кола ДСП показано на рис. 1.

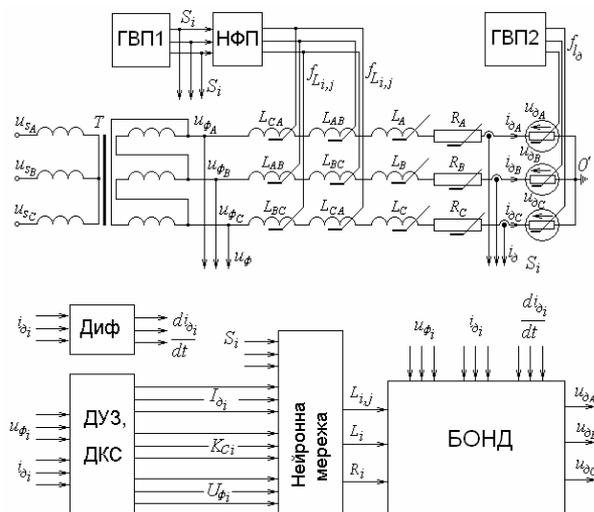


Рис. 1. Функціональна блок-схема цифрової моделі силового кола ДСП

Розроблена модель адекватно відтворює процеси зміни координат ЕР на рівні миттєвих значень, адекватно відтворює реальні стохастичні характеристики процесів зміни збурень за довжиною дуг, а також характеристики процесів зміни активних опорів R_A, R_B, R_C , власних L_A, L_B, L_C та взаємних індуктивностей L_{AB}, L_{BC}, L_{CA} елементів короткої мережі ДСП. В моделі використовуються два генератори випадкових процесів ГВП1 та ГВП2, що генерують адекватні до реальних процеси $S(t_i)$ та $f_{l_0}(t_i)$ зміни положення рукавів електродотримачів (жорстких струмопроводів) та випадкових флуктуацій довжин дуг у плавильному просторі ДСП відповідно.

Нелінійний функціональний перетворювач реалізує математичну модель $\vec{L} = \Psi(\vec{S})$ взаємозв'язку між взаємним положенням у просторі гнучких (кабелів) та жорстких (що прикріплені до рукавів електродотримачів) струмопроводів і поточними значеннями взаємних індуктивностей L_{AB}, L_{BC}, L_{CA} між окремими фазами. Реалізація в моделі нелінійних власних індуктивностей $L_j(i_\delta)$ ($j=A,B,C$), активних опорів $R_j(i_\delta)$, динамічних вольтамперних характеристик дуг $u_\delta(i_\delta)$, а також процесів $S(t_i)$ та $f_{l_0}(t_i)$, які ідентифіковані за результатами експериментальних досліджень режимів дугової печі ДСП-3, дало змогу відтворити в

моделі реальні процеси зміни напруг $u_{\partial}(t_i)$ та струмів $i_{\partial}(t_i)$ дуг як на рівні миттєвих значень, так і процесів на рівні зміни їх діючих значень.

На вхід блоку обчислення напруг дуг БОНД подаються сигнали струмів дуг $i_{\partial A}(t_i)$, $i_{\partial B}(t_i)$, $i_{\partial C}(t_i)$, напруги фаз $u_{\phi A}(t_i)$, $u_{\phi B}(t_i)$, $u_{\phi C}(t_i)$ з точок m (рис.1), які є також вхідними сигналами керування регуляторів потужності дуг, і сигнали з виходів давачів положення рукавів електродотримачів $S_j(t_i)$ відносно деякого базового положення. Давачі усереднених значень ДУЗ (діючих чи середньовипрямлених) і давачі коефіцієнта спотворення синусоїдності ДКС струмів дуг формують на своїх виходах сигнали $I_{\partial j}(t_i)$, $U_{\phi j}(t_i)$ і $K_{c j}(t_i)$ відповідно, які разом зі сигналами $S_j(t_i)$ складають вхідний вектор нейронної мережі. На виходах диференціаторів Диф (поясів Роговського) отримуються похідні $di_{\partial A}(t_i)/dt$, $di_{\partial B}(t_i)/dt$, $di_{\partial C}(t_i)/dt$ миттєвих значень струмів дуг.

На виходах кожної НМ неперервно ідентифікуються процеси зміни параметрів елементів СК печі: активних опорів $R_A(t_i)$, $R_B(t_i)$, $R_C(t_i)$, власних $L_A(t_i)$, $L_B(t_i)$, $L_C(t_i)$ та взаємних індуктивностей $L_{AB}(t_i)$, $L_{BC}(t_i)$, $L_{CA}(t_i)$ елементів силового кола дугової печі.

У блоці обчислення напруг на дугах БОНД з врахуванням ідентифікованих поточних значень параметрів: активних опорів $R_A(t_i)$, $R_B(t_i)$, $R_C(t_i)$ власних $L_A(t_i)$, $L_B(t_i)$, $L_C(t_i)$ та взаємних індуктивностей $L_{AB}(t_i)$, $L_{BC}(t_i)$, $L_{CA}(t_i)$ силового кола ДСП та похідних миттєвих значень струмів дуг $di_{\partial A}(t_i)/dt$, $di_{\partial B}(t_i)/dt$, $di_{\partial C}(t_i)/dt$ на основі моделі СК ДСП неперервно розраховуються поточні миттєві значення напруг на дугах $u_{\partial A}(t_i)$, $u_{\partial B}(t_i)$, $u_{\partial C}(t_i)$.

Блок-схема алгоритму функціонування цифрової моделі силового кола ДСП та моделі оперативного розрахунку напруг на дугах показана на рис. 2. Основний цикл за часом $t \in [0, T_{\max}]$ моделювання ЕР силового кола ДСП реалізується блоками 4–10. Числове інтегрування системи диференціальних рівнянь реалізовано у блоці 5. У результаті числового інтегрування отримуються значення струмів дуг $i_{\partial A}(t_i)$, $i_{\partial B}(t_i)$, $i_{\partial C}(t_i)$ і обчислюються напруги на дугах $u_{\partial A}(t_i)$, $u_{\partial B}(t_i)$, $u_{\partial C}(t_i)$ на кожному кроці інтегрування. У блоці 6 розраховуються значення $f_{i_{\partial}}(t_i)$, $S_j(t_i)$, $u_{\partial A}(i(t_i))$, $L_{ij}(t_i)$. У блоці 7 реалізовано обчислення усереднених на періоді значень напруг $\bar{U}_{\partial j}$ та струмів $\bar{I}_{\partial j}$ дуг, а також за результатами гармонічного аналізу струмів дуг розраховуються значення коефіцієнта спотворення синусоїдності \bar{K}_C . У блоці 8 реалізовано алгоритм ідентифікації активних опорів $R_A(t_i)$, $R_B(t_i)$, $R_C(t_i)$, власних $L_A(t_i)$, $L_B(t_i)$, $L_C(t_i)$ та взаємних індуктивностей $L_{AB}(t_i)$, $L_{BC}(t_i)$, $L_{CA}(t_i)$ елементів СК ДСП синтезованими нейронними мережами. У блоці 9 на основі моделі (2)

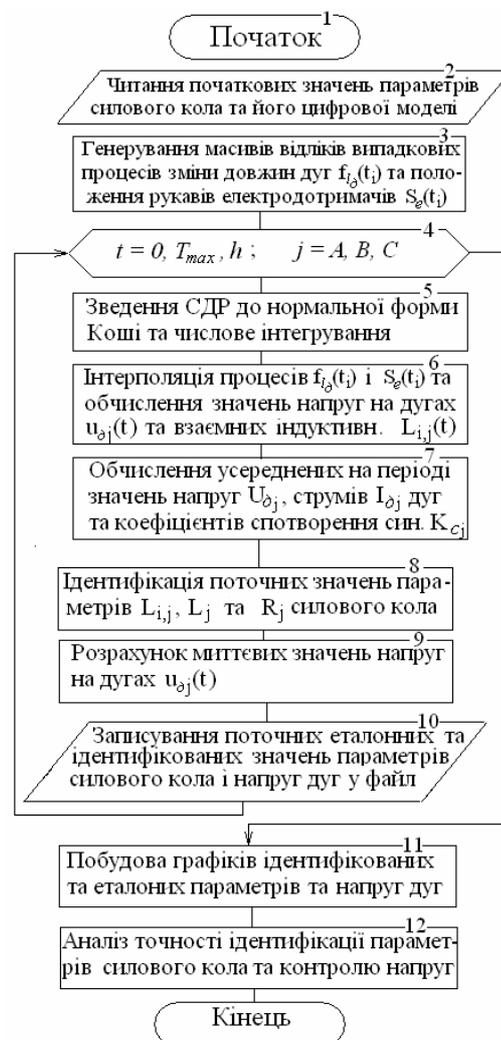


Рис. 2. Блок-схема алгоритму цифрової моделі силового кола ДСП та моделі оперативного розрахунку напруг на дугах

$$\begin{aligned}
u_{\partial A} &= u_{\phi A} - R_A i_{\partial A} - L_A \frac{di_{\partial A}}{dt} - L_{AB} \frac{di_{\partial B}}{dt} - L_{CA} \frac{di_{\partial C}}{dt} ; \\
u_{\partial B} &= u_{\phi B} - R_B i_{\partial B} - L_B \frac{di_{\partial B}}{dt} - L_{AB} \frac{di_{\partial A}}{dt} - L_{BC} \frac{di_{\partial C}}{dt} ; \\
u_{\partial C} &= u_{\phi C} - R_C i_{\partial C} - L_C \frac{di_{\partial C}}{dt} - L_{BC} \frac{di_{\partial B}}{dt} - L_{CA} \frac{di_{\partial A}}{dt}
\end{aligned} \quad (2)$$

розраховуються поточні миттєві значення напруг на дугах $u_{\partial A}(t_i)$, $u_{\partial B}(t_i)$, $u_{\partial C}(t_i)$, тобто реалізовано алгоритм блока обчислення напруг на дугах БОНД (рис. 1). Записування поточних еталонних та ідентифікованих значень параметрів $R_j(t_i)$, $L_j(t_i)$, $L_{AB}(t_i)$, $L_{BC}(t_i)$, $L_{CA}(t_i)$ силового кола ДСП виконується в останньому блоці циклу за часом. У блоках 11 та 12 будуються часові залежності ідентифікованих та еталонних процесів зміни параметрів елементів СК ДСП і виконується розрахунок похибки їх ідентифікації для досліджуваних структур і параметрів нейронних мереж та характеристик збурень.

На рис. 3 і 4 показано розраховані часові залежності вхідних координат нейронної мережі: діючі значення струмів дуг $I_{\partial A}(t_i)$, $I_{\partial B}(t_i)$, $I_{\partial C}(t_i)$ та положення жорстких струмопроводів $S_A(t_i)$, $S_B(t_i)$, $S_C(t_i)$, що прикріплені до рукавів електродотримачів, відповідно.

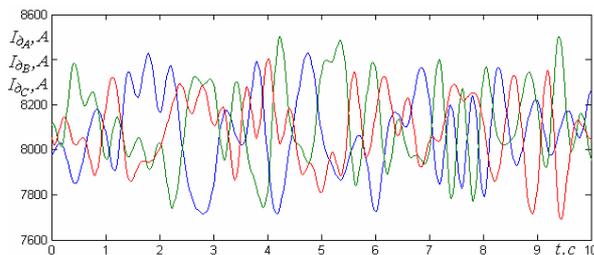


Рис. 3. Часові залежності струмів дуг $I_{\partial A}(t_i)$, $I_{\partial B}(t_i)$ та $I_{\partial C}(t_i)$ на вході нейронної мережі

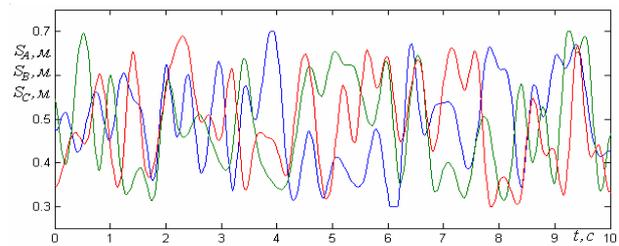


Рис. 4. Часові залежності сигналів положення жорстких шинопроводів $S_A(t_i)$, $S_B(t_i)$, $S_C(t_i)$ на вході нейронної мережі

Еталонні значення параметрів L_{AB}^e , L_{BC}^e , L_{CA}^e , L_A^e , L_B^e , L_C^e , R_A^e , R_B^e , R_C^e елементів СК печі для навчання НМ отримуються за результатами розрахунків (розв'язування систем лінійних алгебричних рівнянь) з використанням даних, що отримуються в активних (спеціально поставлених) та пасивних експериментах на дуговій печі на різних стадіях плавлення. Так, на основі цих розрахунків отримано наступні емпіричні формули для відтворення в цифровій моделі реальних процесів зміни власних індуктивностей $L(I) = -2.747 \cdot 10^{-10} \cdot I^3 + 7.953 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 - 2.274 \cdot 10^{-4} \cdot I + 0.034$ та активних опорів $R(I) = -4.171 \cdot 10^{-10} \cdot I^3 + 2.742 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 - 5.877 \cdot 10^{-5} \cdot I + 5.872 \cdot 10^{-3}$.

Як показали дослідження, ідентифікацію параметрів елементів СК ДСП доцільно виконувати на основі НМ з прямою передачею сигналів та алгоритмом навчання на основі зворотного розповсюдження похибки "back propagation". Найкращі результати ідентифікації взаємних індуктивностей (найменші відносні похибки) отримано для НМ з одним прихованим прошарком з 20 нейронами та активаційною функцією – tansig.

На рис. 5 зображено ідентифіковані та еталонні процеси зміни взаємних індуктивностей $L_{AB}(t_i)$ і $L_{CA}(t_i)$ короткої мережі ДСП, що ідентифікуються синтезованою нейронною мережею із вказаною вище структурою, характеристиками і параметрами. Аналіз процесів ідентифікації показує, що найбільша на дослідженому часовому інтервалі $T_{\max} = 30c$ відносна похибка ідентифікації мала місце у фазі С (момент часу $t \approx 18.5c$) і яка склала 2% відносно еталонного значення.

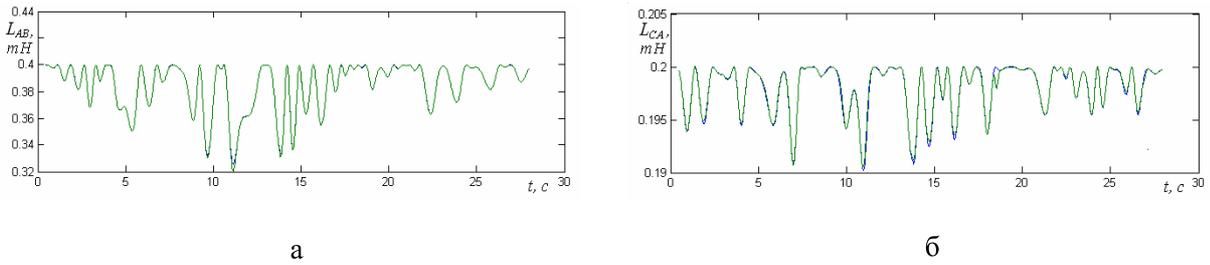


Рис. 5. Часові залежності ідентифікованих та еталонних процесів зміни взаємних індуктивностей $L_{AB}(t)$ (а) та $L_{CA}(t)$ (б)

Високу точність отримано також при ідентифікації інших параметрів короткої мережі та розрахунку напруг на дугах. На рис.6, як приклад, проілюстровано отримані на описаній вище цифровій моделі еталонні та ідентифіковані запроектованою нейронною мережею процеси зміни активного опору $R_j(t_i)$ та власної індуктивності $L_B(t_i)$ елементів у фазі В силового кола ДСП (у фазі де спостерігається найбільша динаміка зміни параметрів та координат електричного режиму).

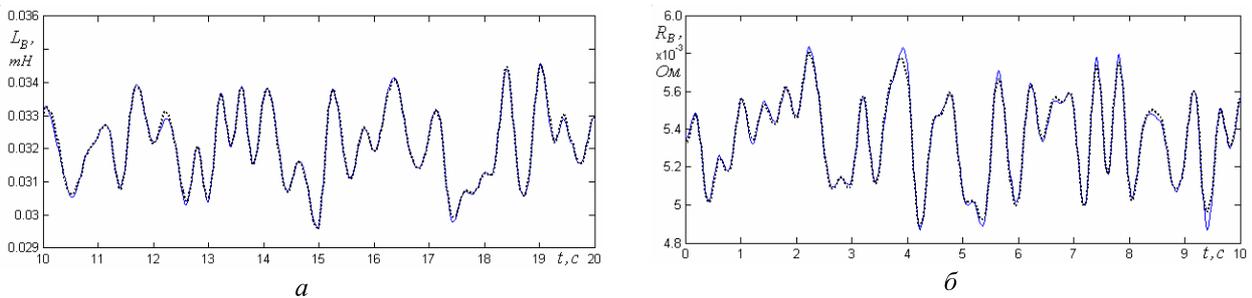


Рис. 6. Часові залежності ідентифікованих та еталонних процесів зміни активного опору $R_B(t_i)$ (а) та власної індуктивності $L_B(t_i)$ (б) елементів у фазі В силового кола дугової печі

Показані на рис.6 результати ідентифікації процесів $R_j(t_i)$ та $L_B(t_i)$ отримані на виходах нейронних мереж з одним прихованим шаром з 4 нейронами та та активаційною функцією – tansig.

Висновок. Отримані результати симулювання режимів силового кола ДСП підтвердили адекватність розробленої математичної моделі процесів СК ДСП і показали високу точність ідентифікації параметрів елементів СК дугової печі на основі використання нейронної мережі. Це дає підставу стверджувати про доцільність використання розробленої моделі нейромережевої системи контролю параметрів елементів силового кола дугової печі для дослідження ефективності та точності запропонованої системи оперативного розрахунку напруг на дугах.

1. Марков Н.А., Баранник О.В. Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых печей. – М.: Энергия, 1973. – 104 с. 2. А. с. 1086557 СССР, МКИ Н05В 7/148. Устройство для определения электрических параметров токопровода и напряжения дуг трехфазной дуговой печи // Б.Д. Денис, Я.Ю. Марущак. – Опубл. 15.04.84. – Бюл. № 14. 3. Паранчук Р.Я. Эксплуатационный контроль параметров та напруг дуг дугової сталеплавильної печі на основі нейронної мережі // Вісник НТУ ХПІ. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика”. – Харків: НТУ ХПІ, 2008. – С. 580–581.