

УДК 621.37/38/39; 621.372.2

В. Г. КУДРЯ

## МОДЕЛІ МІЖЗ'ЄДНАНЬ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Виконано дослідження способів інтерпретації мережі міжз'єднань високочастотної, в тому числі і нанотехнологічної електроніки. Системний спосіб їх подання у вигляді синтезу польової та ланцюгової структури дозволив розробити теоретичне обґрунтування схемотехнічного зображення електромагнітних процесів провідників, що утворюють комунікативну мережу компонентів, що виконують локальні функціональні перетворення. Отримані макромоделі міжз'єднань, що дозволяють виконувати оцінки впливу, як внутрішніх, так і зовнішніх позасистемних електромагнітних перешкод. Результати дослідження спрямовані на підвищення ефективності проектування засобів інформаційно комунікаційних технологій.

**Ключові слова:** високочастотна електроніка, моделі електромагнітних перешкод, MEMC, HEMC, CAD.

**Вступ.** Темпи розвитку електроніки, настільки великі, що існуючі на сьогоднішній день емпіричні способи та методи виробництва [1...4] випереджають відповідні темпи зростання її фундаментальних, системних методів дослідження та системних технологій проектування [5...8]. Незважаючи на обчислювальні потужності сучасних комп'ютерів, існуючі пакети [2] аналізу електронних засобів (CAD): Spice, MicroCap, OrCad, MultiSim, Atium Designer, – далеко не відповідають запитам технології проектування мікро- та нано- електроніки. Синергетичність різноманітних природних явищ, що забезпечують функціонування нановиробів [9] лише частково піддається моделюванню в межах існуючих програмних продуктів. З цих причин розробка адекватних фізикоматематичних моделей стало предметом дослідження. Переважна більшість робіт [10] переймається розкриттям існуючих, або відкриттям нових природних явищ та процесів, що можуть скласти основу функціонування базових (елементарних, «атомарних») компонентів внутрішньої структури монолітної нанотехнологічної інтегральної схеми. В той же час, питання конструктивно-системної організації цих первинних (атомарних) компонентів та способи їх поєднання і взаємодії (електромагнітної, теплової, радіаційної тощо) в рамках функціональної реалізації розв'язується на основі емпірико експериментальних досліджень.

**Постановка проблеми та ціль дослідження.** Обмежуючи дослідження обліком електромагнітних перешкод міжз'єднань слід зауважити, що переважна більшість CAD [2] орієнтується на мінімізацію сумарної довжини трасових доріжок. Разом з тим, такий критерій оптимізації залишаючись справедливим для низькочастотної електроніки є хибним для швидкодіючої цифрової електроніки, що забезпечує швидкодію від гіга до терабайтів мікрооперацій за секунду. Такий стан речей безумовно гальмує розвиток мікро-, а тим більше наноелектроніки.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою дослідження стало моделювання електромагнітного впливу міжкомпонентних поєднувачів базових елементів, що складають внутрішню структуру як окремих компонентів комп'ютерних систем у вигляді монолітної інтегральної схеми, так і комп'ютерних систем в цілому.

**Аналоги рівнянь Кірхгофа для комунікатора.** Конструктивний етап проектування електричного кола здійснюється шляхом з'єднання полюсів його компонентів провідниками струму, що забезпечують між компонентами обмін електромагнітною енергією.

Нагадаємо, що міжз'єднання, як мережа електропровідних зв'язків, які поєднують між собою компоненти будь-якого електронного пристрою або електронної системи, охоплюється одним узагальненим поняттям – комунікатор [8]. Іншими словами комунікатор - розмаїття реальних конструкцій провідників (ліній зв'язку, фідерів, контактних доріжок друкованих плат, конекторів, нанодоріжок тощо).

Історично теорія електричних кіл створювалася для опису процесів в електромагнітних системах, зв'язаних металевими дротами. В класичній теорії ланцюгів комунікатор, як джерело внутрішніх системних електромагнітних завад, або взагалі не враховувався, або замінювався відрізками симетричних довгих ліній. У той же час нанотехнології [10] дозволяють створювати мініатюрні системи, у яких комунікатори істотно впливають на електромагнітний процес, причому цей вплив не можна врахувати методами теорії однорідних чи симетричних неоднорідних ліній. Щоб «просунути» теорію ланцюгів в нанотехнології, необхідно додати до розрахункових моделей рівняння комунікатора, що задовольняють певними умовам: рівняння повинні бути записані для тих же невідомих, котрі фігурують у компонентних рівняннях, тобто для напруг і струмів багатополосників, приєднаних до комунікатора; форма запису рівнянь комунікатора не повинна залежати від способів електродинамічного визначення параметрів комунікатора.

Розподіл кола на компоненти і комунікатори зв'язано не тільки з конструктивними особливостями цих частин, але і з розходженням в описі їхніх електромагнітних проявів. Головні розходження між компонентом і комунікатором полягають у тому, що для комунікатора через велику довжину проводів і їхньої викривленості не можна: вводити в довільних місцях комунікатора поняття напруги і струму без вказівки геометричних характеристик шляхів (для напруг) та поверхонь інтегрування (для струмів); вважати виконаними рівняння Кірхгофа.

Комунікатор сучасного кола являє собою сукупність дерев струмопровідних розгалужених доріжок, що розташовані на платі, або об'ємі тіла чіпа. Введемо поняття морфологічної структури комунікатора. Структура – це реальна конструкція комунікатора, що визначається його геометричною формою (площинна, об'ємна) та електродинамічними матеріальними параметрами. Якщо вважати компоненти геометрично точковими структурами, і вилучити ці точки із структури комунікатора, то остання розсиплеться на окремі

дерева, що не мають між собою гальванічних контактів. Таким чином, кожному «геометричному» дереву в класичній теорії ланцюгів, відповідає вузол. Будь-які дескриптори комунікатора, в тому числі струми і напруги вводяться лише в області їх однозначного визначення (ОВНС), а саме, - в місцях зчленування «точкових» компонентів [8] з комунікатором.

Для кожного дерева комунікатора справедливий електродинамічний закон повного струму в інтегральній формі:

$$\sum_{\text{полюси}} i_k(t) = i_{zc}(t) + i_{\text{вум}}(t), \quad (1)$$

де  $i_k(t)$ ,  $i_{zc}(t)$ ,  $i_{\text{вум}}(t)$  – струми провідності, зсуву та витоку, відповідно, з окремого дерева (вузла) комунікатора.

Частини провідників, що належать окремим деревам і проміжки між полюсами компонентів утворюють замкнутий контур, для якого на підставі закону електромагнітної індукції можна записати

$$\sum_{\text{контур}} u_k(t) = u_l(t) + u_R(t) \quad (2)$$

де  $u_{kH}(t)$ ,  $u_l(t)$ ,  $u_R(t)$  – напруги, відповідно, компонентів, наведені (за законом Фарадея) та омичні напруги усіх провідників, що утворюють контур.

Величини формул (1), (2) –  $i_{zc}(t)$ ,  $i_{\text{вум}}(t)$ ,  $u_H(t)$ ,  $u_R(t)$  залежать від типу і режиму роботи комунікатора і визначаються його електромагнітним полем:

$$i_{zc}(t) = -\frac{d}{dt} \int_{S_0} \bar{D} \cdot d\bar{S}; \quad i_{\text{вум}}(t) = \gamma_0 \int_{S_0} \bar{E} \cdot d\bar{S}; \quad (3)$$

$$u_H(t) = -\frac{d}{dt} \int_{S_k} \bar{B} \cdot d\bar{S}; \quad u_R(t) = -\sum_{\Delta_k} \int \bar{E} \cdot d\bar{l}$$

де  $\bar{E}$ ,  $\bar{D}$  – вектори напруженості та індукції електричної, а  $\bar{B}$  – магнітної індукції електромагнітного поля, джерелом якого комунікатор,  $S_0$  – бічна поверхня провідників дерева, а  $S_k$  – площа, що охоплюється контуром,  $\Delta_k$  – довжина окремої гілки контура, що закінчується в точці розташування компонента.

Рівняння (1) та (2) можна трактувати, як еквіваленти першого та другого законів Кірхгофа для комунікатора. В цих рівняннях, на відміну від класичних рівнянь Кірхгофа, доданки правих частини рівнянь (1), (2) відбивають морфологічну структуру комунікатора. Їх визначення спряжено з розв'язком відповідних задач електродинаміки з цілком коректним задаванням джерел електромагнітного поля, граничних умов та матеріальних параметрів середовища [8].

Виникає питання: «Як розв'язувати крайову задачу електродинаміки, описану рівняннями в приватних похідних, у випадках, коли комунікатор містить тисячі і більше вузлів?». Розв'язання такої узагальненої задачі лежить в площині дезінтеграції комунікатора на його структурні композиційні елементи, кожний з яких матиме або площинно паралельну, або сферопаралельну структуру поля. Потоки векторів індукції,

що фактично з точністю до постійних множників, представляють собою інтеграли (3), в таких полях обчислюються, як різниці векторних та відповідно скалярних потенціалів [8]. Враховуючи, що поля сферопаралельних структур можна обчислювати за «прототипом» площинно паралельних полів з відповідною заміною координат, можна стверджувати, що обчислення диференціальних значень векторів напруженості (3) електромагнітного поля комунікатора, як правило, не є обов'язковою процедурою. Разом з тим, при необхідності завжди можна визначити рівень похибки переходу від диференціальних до інтегральних характеристик поля та порівняти її з максимально допустимим значенням.

**Польові схеми заступу.** Представлення реальної електромагнітної системи у вигляді фізичної моделі, що має вигляд електричного кола, можливо, якщо припустимий поділ єдиного електромагнітного процесу на окремі незалежні процеси в компонентах і комунікаторі. На жаль, в нанотехнологіях практично неможливо відокремити ці процеси один від одного, але при певній додатковій конструктивній збитковості: екранування, рознесення у просторі, цей вид взаємовпливу можна звести до мінімально допустимих проявів. Але і в цьому випадку рівень допустимості застосування тієї чи іншої моделі мусить, в розрахунковому розумінні, ґрунтуватися на використанні певних електродинамічних оцінок. Рівень адекватності відповідно до теореми єдності, можна оцінити рівнем напруг та струмів, величинами яких можна нехтувати, якщо за допомогою екранування забезпечити виконання наступних умов:

а) екрани є добре провідними, тобто дотична складова електричного поля  $E_\tau$  до поверхні екрана  $Se$  мізерно мала у порівнянні з нормальною  $E_n$

$$E_n \gg E_\tau \approx 0 \quad \text{для } Se; \quad (4)$$

б) в об'ємі, що обмежується екраном, мають місце втрати електроенергії, тобто існують струми в провідниках комунікатора, що мають скінченну провідність  $0 < \gamma < \infty$ ;

в) в ОВНС (вікно  $S_0$  зчленування компонента та комунікатора) електромагнітне поле має структуру Т-хвилі, тобто повздовжні складові напруженостей поля, що є нормальними складовими до поверхні вікна  $S_0$  взаємодії комунікатора та компонента, мізерно малі

$$E_\tau \gg E_n \approx 0; \quad H_\tau \gg H_n \approx 0; \quad \text{для } S_0 \quad (5)$$

Зрозуміло, що всередині екранованого комунікатора виконання (4) та (5) зовсім не гарантується. Картина поля змінюється за рахунок не лише геометричних неоднорідностей поверхонь розподілу напрямних систем в об'ємі комунікатора, а і за рахунок зміни зарядів та струмів на їх поверхнях, що суперечить аксіоматиці застосування багатьох спрощених методів аналізу електродинаміки, в тому числі і теорії довгих ліній [8].

Разом з тим, на частотах квазістаціонарної допустимості поділу поля на магнітне та електричне можна визначити струми, що наводяться на деревах комунікатора, та напруги, що наводяться в його контурах як

$$\dot{I}_H = \Phi j \omega \dot{N}, \quad \dot{U}_H = -j \omega \dot{\Phi}, \quad (6)$$

де  $\dot{N}, \dot{\Phi}$  – потоки комплексних векторів індукції електричного та магнітного поля, що пронизують дерева та, відповідно, контури комунікатора. Безпосередніми джерелами цих потоків є заряди, що розподілені по поверхням дерев та струми, що течуть в провідниках комунікатора. Таким чином, для визначення потоків  $\dot{N}, \dot{\Phi}$  необхідно попередньо визначити їх безпосередні джерела. В свою чергу джерелами безпосередніх джерел в даній математичній моделі є струми полюсів, комунікатора та напруги його дуг. Останні входять до дескрипторів компонентно-комунікаторних рівнянь, які характеризують замкнуту математичну модель електричного кола в цілому. З огляду на це, струми полюсів та напруги дуг компонента можна назвати опосередкованими джерелами електромагнітного поля комунікатора. Незважаючи на те, що ці опосередковані джерела не мають геометричних вимірів, вони відіграють роль крайових умов, для визначення розподілу по поверхням комунікатора первинних джерел його електромагнітного поля. В даному випадку поняття крайові вжиті з огляду на те, що кожне дерево комунікатора приєднується до компонентів через полюси в областях ОВНС, що поєднують геометрично вимірні напруги та струми комунікатора з «топологічними» струмами та напругами компонентів. Компоненти у порівнянні з комунікатором вважаються мізерно малими, тобто такими що мають нульові геометричні розміри.

Оскільки методи розв'язання задач електродинаміки по визначенню потоків  $N, \Phi$  достатньо відомі [8], то ґрунтуючись на порівнянні наведених в комунікаторі струмів та напруг (6) з допустимими їх значеннями, можна оптимізувати конструкцію комунікатора виходячи з критеріїв внутрішньої електромагнітної сумісності.

**Ланцюгова модель комунікатора.** Теорія лінійних електричних кіл є найбільш розвинутим науковим напрямом, що практично досягла свого апогею внаслідок вимог суспільного запиту в сфері інфокомунікаційних технологій. Різноманітні види аналізу електричних кіл реалізовані в чисельних системах автоматизованого проектування: MicroCap, EWB, MultiSim, OrCad, Altium Designer тощо. Тому, залишаючись на позиціях обліку електромагнітних перешкод в рамках електродинаміки, спробуємо побудувати ланцюгові схеми заступу комунікатора, враховуючи, що поняття параметрів компонентів R, L, C, G лише за розмірністю співпадають з параметрами комунікатора [8]. Такий підхід дозволить «просунути» накопичений багаж знань теорії електричних кіл в сферу нанотехнологічного виробництва. Цьому сприяє використання означеної вище ідеї декомпозиції нововиробу на ті його композиційні елементи, в яких «працює» теорія ланцюгів і ті – в яких її застосування є хибним.

Розглянемо процедуру побудови еквівалентної схеми комунікатора. Для цього введемо його електродинамічні параметри, що представляються у вигляді матриць

$$\begin{bmatrix} R^d \\ Z^d \end{bmatrix}_{q,n}; \begin{bmatrix} G^d \\ Y^d \end{bmatrix}_{r,n}, \quad (7)$$

де  $d$  – верхній індекс, що вказує на їх відмінність від параметрів зосереджених компонентів; нижні індекси визначають розмірність:  $n$  – сумарна кількість полюсів усіх компонентів;  $q$  та  $r$  – кількість незалежних контурів, та незалежних дерев (вузлів) комунікатора.

Електродинамічні параметри (7) дозволяють встановити взаємозв'язок між струмами та напругами полюсів компонентів та правими частинами (1), (2) у вигляді матричних рівнянь

$$\begin{bmatrix} \dot{U}^R \\ \dot{I}^G \end{bmatrix}_{q,1} = \begin{bmatrix} R^d \\ Z^d \end{bmatrix}_{q,n} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}_{n,1}; \quad \begin{bmatrix} \dot{U}^\Phi \\ \dot{I}^N \end{bmatrix}_{r,1} = \begin{bmatrix} Z^d \\ Y^d \end{bmatrix}_{r,n} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}_{n,1}, \quad (9)$$

де  $\begin{bmatrix} \dot{U}^R \\ \dot{U}^\Phi \end{bmatrix}_{q,1}; \begin{bmatrix} \dot{I}^G \\ \dot{I}^N \end{bmatrix}_{r,1}$  наведені в контурах комунікатора омичні та відповідно фарадесві напруги, опосередкованими джерелами яких є струми полюсів  $\begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}_{n,1}$ , а  $\begin{bmatrix} \dot{I}^G \\ \dot{I}^N \end{bmatrix}_{r,1}$  – матриці стовпці струмів витоку та зсуву з незалежних дерев, що виникають за рахунок напруг дуг  $\begin{bmatrix} \dot{U} \end{bmatrix}_{n,1}$  комунікатора.

Рівняння (1), (2), (8), (9) та сукупність компонентних рівнянь, дозволяють скласти узагальнену математичну модель, яка в кінцевому підсумку може бути представлена у вигляді замкнутої системи матричних рівнянь, що складена відносно невідомих – струмів полюсів та напруг дуг усіх компонентів

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{2n,2n} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}_{n,1} \end{bmatrix}_{2n,1} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}_{2n,1}, \quad (10)$$

де  $\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}_{2n,2n}$  – відома матриця, елементи якої обчислюються через параметри комунікатора та компонентів,  $\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}_{2n,1}$  – відома матриця, елементи якої відображають джерела активних компонентів.

Рівняння (8), (9) встановлюють зв'язок між дескрипторами узагальної математичної моделі (10) через параметри комунікатора. Під дескрипторами слід розуміти струми полюсів та напруги дуг комунікатора в областях ОВНС. Зазначені струми та напруги, як і в теорії електричних кіл, можна вважати точковими, тобто такими, що не мають геометричних розмірів. Але враховуючи, що області ОВНС є енергетичними гранями поєднання «точкових» компонентів, та розподіленого у просторі комунікатора, що вже характеризуються певними геометрико-морфологічними властивостями, будемо вважати, що дескриптори є крайовими умовами для розв'язання задач електродинаміки по визначенню параметрів комунікатора. В подальшому крайові умови будемо називати струмовими (струми полюсів) (11) та напруговими (напруги дуг) (12). Нагадаю, що саме вони і є опосередкованими джерелами електромагнітного стану комунікатора. Термін «опосередкованість» вжитий в тому розумінні, що безпосередніми джерелами електромагнітних по-

лів комунікатора є його провідникові дерева, які характеризуються геометричними координатами.

Основу побудови схемотехнічного ланцюгового зображення можуть складати два підходи, один з яких ґрунтується на зовнішньому прояві властивостей комунікатора як «чорної скриньки», а інший на внутрішньому представленні комунікатора з певними схемами відзеркалення електромагнітного процесу комунікатора у вигляді зосереджених та (або)

розподілених компонентів. Безумовно, для цього потрібно знати матеріальні параметри  $\epsilon$ ,  $\mu$ , та  $\sigma$  середовища комунікатора. На рівні зовнішнього прояву схеми будуються у вигляді залежних джерел електроенергії, рис. 1.

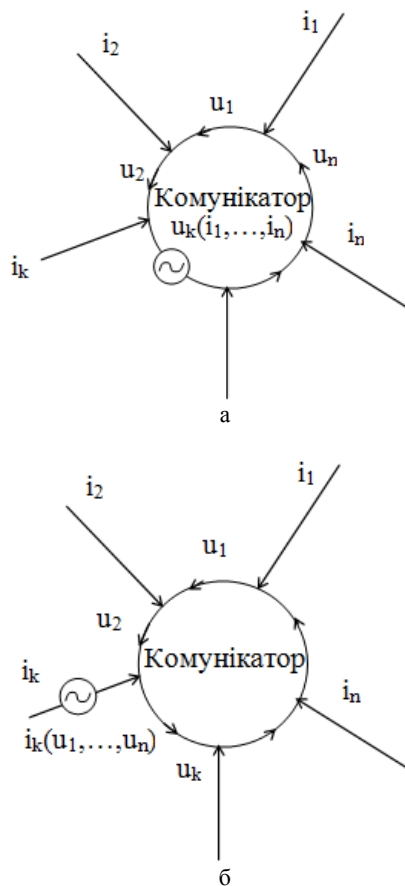


Рис. 1 – Схема заміщення комунікатора для визначення впливу параметрів комунікатора: а - омичних втрат провідників та магнітних потоків; б - омичних втрат в діелектриці та електричних потоків

В рамках запропонованої моделі необхідно розрізнити опосередковані джерела, що визначаються множинами струмів та полюсів та напруг дуг компонентів і безпосередні джерела електромагнітного поля комунікатора, тобто розподіл струмів вздовж провідників та розподіл напруг (зарядів) по поверхнях дерев комунікатора. Іншими словами, при розв'язанні задачі електродинаміки первинні крайові умови для цих задач задають на енергогранях в області ОВНС. Залежні джерела електроенергії визначаються після цього у вигляді матричних лінійних залежностей, між впливом та реакцією через матрицю електродинамічних параметрів комунікатора, спосіб обчислення елементів якої визначається з (8) та (9).

Внутрішній прояв схеми заміщення ґрунтується на знанні локальних джерел внутрішнього електромагнітного стану, а точніше на його моделюванні у вигляді зосереджених компонентів комунікатора, рис. 2.

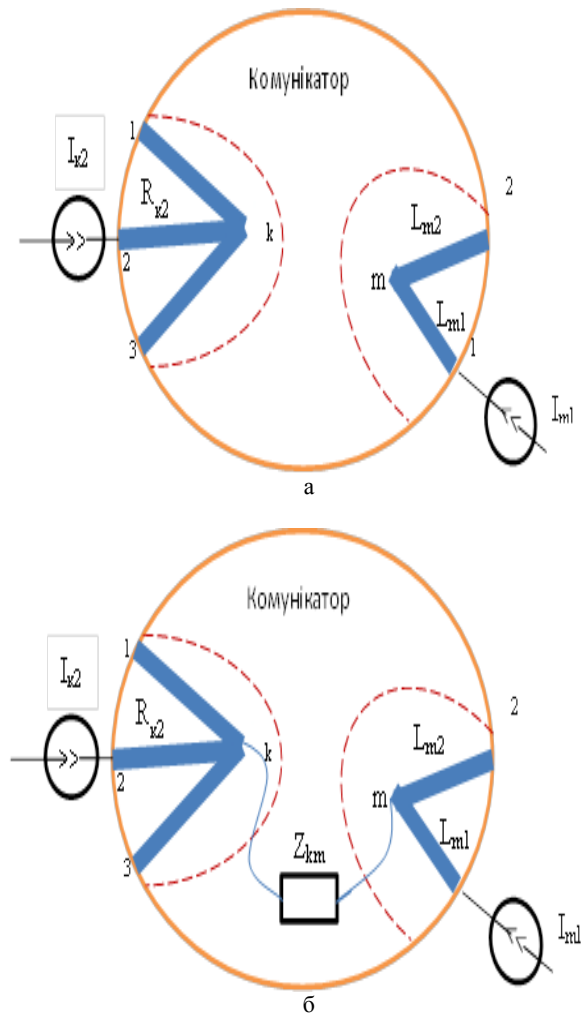


Рис. 2 – Фрагменти схеми: а – струмові джерела; б – напругові джерела

Для визначення їх параметрів за безпосередніми (геометрично розподіленими) струмовими джерелами провідників та напруговими джерелами поверхонь дерев визначають потоки: векторів густини струму через перетин провідників комунікатора; векторів магнітної індукції через довільно обрану сукупність незалежних контурів; векторів густини струму в діелектриках, що розташовані в просторі між деревами; векторів електричної індукції з поверхонь незалежних дерев.

Зазначені підходи мають певну аналогію з принципами синтезу чотириполюсників та довгих ліній на основі первинних та вторинних параметрів [17]. Тобто перший спосіб аналогічний використанню вторинних параметрів, а другий спосіб моделювання еквівалентний використанню первинних (погонних параметрів) комунікатора.

**Висновки.** Таким чином, в даній роботі приведено дослідження електронних виробів, що характеризуються суттєвим впливом електромагнітних полів міжз'єднань на їх інтегральні характеристики. Запро-

поновано новий системний підхід до розробки фізико-математичного моделювання швидкодіючих компонентів електроніки. Спосіб інтерпретації комунікатора у вигляді польової та ланцюгової структури його схемотехнічного зображення об'єднують задачі схемотехніки та конструювання в єдину системну модель аналізу інтегральної електроніки. Отримані результати сприятимуть підвищенню точності моделей в процесі схемотехнічного проектування.

**Список літератури:** 1. *Новосядлий, С. П.* Особливості схемотехнічного та фізико-топологічного проектування аналогових інтегральних компараторів [Текст] / С. П. Новосядлий // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 4/5 (70). – С. 4–15. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26251 2. *Кечієв, Л. Н.* Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры [Текст] / Л. Н. Кечієв. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с. 3. *Кагадей, В.* Технологии будущего: наноматериалы и нанoeлектроника [Электронный ресурс] // <http://www.youtube.com/watch?v=VDJA93OSXrI> Загружено – 29 ноября 2011. 4. *Кудря, В. Г.* Фізико-математичне моделювання в нанoeлектроніці [Текст] / В. Г. Кудря, Ю. О. Лемехов // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2013. – № 1/2 (61). – С. 7–11. 5. *Microelectromechanical Systems and Devices* / Edited by Nazmul Islam // Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2012. – 492 p. 6. *Кудря, В. Г.* Фізико-математичне моделювання в нанoeлектроніці [Текст] / В. Г. Кудря, Ю. О. Лемехов, Є. Л. Саркісян // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2012. – № 5/3 (59). – С. 10–13. 7. *Скопєцький, В. В.* Математичне моделювання динаміки розподілених просторово-часових процесів [Текст] / В. В. Скопєцький, В. А. Стоян, В. Б. Зваридчук. – К.: Видво «Сталь», 2008. – 316 с. 8. *Кудря, В. Г.* Моделювання нанотехнологічних електронних засобів. Монографія. [Текст] / В. Г. Кудря //

Україна, Херсон: Олді-плюс, 2013. – 780 с. 9. *Хакен, Г.* Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействиях [Текст] / Г. Хакен // Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 320 с. 10. A resource for nanoscience and nanotechnology, nanoHUB.org was created by the NSF-funded Network for Computational Nanotechnology. [Электронный ресурс] / Copyright © 2009 NCN. <http://nanohub.org/>

**Bibliography (transliterated):** 1. *Novosyadlyy, S. P.* (2014). Osoblyvosti skhemotekhnichnoho ta fizyko-topolohichnoho proektuvannya analohovykh intehr'al'nykh komparatoriv. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 4/5 (70), 4–15. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26251 2. *Kechiyev, L. N.* (2007). Proyektirovaniye pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury. Moscow: ООО «Группа ИДТ», 616. 3. *Kagadey, V.* Tekhnologii budushchego: nanomaterialy i nanoelektronika [Yelectronnyy resurs] <http://www.youtube.com/watch?v=VDJA93OSXrI> Zagruzhenno – 29 noyabrya 2011. 4. *Kudrya, V. H., Lyemyekhov, Yu. O.* (2013). Fizyko-matematychne modelyuvannya v nanoelektronitsi. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 1/2 (61), 7–11. 5. *Microelectromechanical Systems and Devices* (2012). Edited by Nazmul Islam. Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 492. 6. *Kudrya, V. H., Lyemyekhov, Yu. O., Sarkis'yan, Ye. L.* (2012). Fizyko-matematychne modelyuvannya v nanoelektronitsi. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 5/3 (59), 10–13. 7. *Skopets'kyi, V. V., Stoyan, V. A., Zvarydchuk, V. B.* (2008). Matematychne modelyuvannya dynamiky rozpodilenykh prostorovo-chasovykh protsesiv. Kiev: Vyd-vo «Stal'», 316. 8. *Kudrya, V. H.* (2013). Modelyuvannya nanotekhnolohichnykh elektronnykh zasobiv. Monografiya. Ukrayina, Kherson: Oldi-plyus, 780. 9. *Khaken, G.* (2003). Tayny prirody. Sinergetika: ucheniye o vzaimodeystvii. Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 320. 10. A resource for nanoscience and nanotechnology, nanoHUB.org was created by the NSF-funded Network for Computational Nanotechnology. Copyright © 2009 NCN. <http://nanohub.org/>

Надійшло (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кудря Володимир Григорович** – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри "Комп'ютерних систем"; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: [st1537@stalker.in.ua](mailto:st1537@stalker.in.ua).

**Kudrya, Volodymyr** – candidate of technical sciences, associate professor, Odessa National Polytechnic University; Boulevard of Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: [st1537@stalker.in.ua](mailto:st1537@stalker.in.ua).

УДК 615.47

**О. Г. АВРУНИН, М. Ю. ТЫМКОВИЧ**

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ВНУТРИМОЗГОВОЙ СИСТЕМЫ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКИХ КООРДИНАТ НА ОСНОВЕ ЛОФТИНГОВОЙ МОДЕЛИ ТРЕТЬЕГО ЖЕЛУДОЧКА

Работа посвящена возможностям автоматизированной реконструкции модели третьего желудочка с последующим её использованием при нейронавигации, что позволяет выполнять построение внутримозговой системы стереотаксических координат по томографическим данным с учетом индивидуальной вариабельности пациента. В работе рассматриваются основные этапы по реконструкции лобтинговой модели по набору томографических горизонтальных срезов. Наглядно показана возможность автоматизированного построения лобтинговой модели третьего желудочка, с учетом определенных ограничений к исходным данным.

**Ключевые слова:** нейронавигация, стереотаксис, лобтинговая модель, третий желудочек, компьютерная томография, реконструкция, сегментация.

**Введение.** Одним из наиболее активно используемых методов доступа в нейрохирургии является стереотаксис [1-3]. Хирургические вмешательства, с использованием стереотаксиса обладают исключительной точностью введения хирургического инструмента к необходимой области мозга. Это позволяет использовать стереотаксические процедуры не только при биопсии участков мозга, дренаже полостей головного мозга, а и при функциональной нейрохирургии, к примеру, для борьбы с паркинсонизмом [4], эпилепсией [5] и т. п.

Стереотаксическая хирургия представляет собой метод хирургического вмешательства, при котором доступ к целевой структуре осуществляется с использованием пространственной системы координат, которая "привязана" к данным интроскопического исследования. Это совмещение позволяет проводить хирургическое вмешательство не только по классической схеме (рамный стереотаксис [6]), а и по безрамной [7].

© О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович. 2015