
ОГЛЯДИ. ПОЛЕМІКА. ОБМІН ДОСВІДОМ

УДК 681.004.94

МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОДІЮЧИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ*Кудря В. Г., к.т.н., доцент**Одеська національна академія харчових технологій**Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики,
м. Одеса, Україна***MODELING OF HIGH-SPEED ELECTRONIC DEVICES***Kudrya V. G., PhD, Associate Professor**Odessa National Academy of Food Technologies. Educational and Research Institute of
Refrigeration, Kriotehnohohiy and Ekoenerhetyky, Odessa, Ukraine***Вступ, формулювання проблеми**

Темою публікації є моделювання електронних засобів, що працюють в діапазонах частот від нуля до терагерц та вище. Застосування нових принципів та технологій, в тому числі біо- та нанотехнологій, розробки монолітних інтегральних схем призвели до відставання технологій проектування від технологій їх експериментального дослідження та виготовлення. Так склалося, що розроблені пакети аналізу електронних засобів: Spice, MicroCap, OrCad, MultiSim, Atium Design, що дістали світове визнання, – характеризуються певними недоліками. Головний з них – неможливість імітація процесів, тобто таких видів аналізу як DC, AC, TC враховувати морфологічні та, одночасно, на топологічні властивості електричного кола. Можна стверджувати, що лівова доля виготовлених неякісних монолітних інтегральних схем сягає 50% внаслідок користування неадекватними фізико-математичними моделями згаданих САД. Усунення цього недоліку, на що **спрямоване дослідження**, є достатньо **актуальною** проблемою сьогодення. Дійсно, вже зараз [1, 2] співвідношення технологів проектувальників до технологів виробничих процесів в наноелектроніці сягає приблизно 50 до 1. В рамках існуючих фізико-математичних моделей, що не відображають синергетичний ефект в наноелектроніці це співвідношення лише зростатиме.

Таким чином, **ціллю** даної роботи являється розробка етапів моделювання, що відображають не лише топологічні, а і морфологічні властивості об'єкта проектування в рамках обліку електромагнітних перешкод комунікаційних шляхів передачі енергії та інформації в об'ємі монолітної інтегральної схеми. Оскільки забезпечення енергетичної автономії дерев кому-

нікаційних структур та самих нанобазових неоднорідностей неможливо здійснити шляхом їх екранування, то без таких алгоритмів, проектування та аналіз наноелектронних виробів є **проблематичною** задачею.

Компоненти та комунікатор

Можна стверджувати, що аксіоматика проектування високочастотних електричних кіл, обґрунтованих в електродинамічний спосіб, [3...7] відображає специфіку проектування нанотехнологічної електроніки. Проектування монолітних інтегральних схем ґрунтується на відомостях про феноменологічні характеристики найелементарніших (атомарних, композиційних) складових схеми. Разом з тим, будь-які екзотичні природничі явища [8...10], за умови їх відтворення у вигляді зовнішніх характеристик атомарних елементів системи, не є суттєвими [6, 11] при розробці математичних моделей аналізу та синтезу. Керуючись цими міркуваннями побудуємо системну модель аналізу електричного кола, яка б увібрала в себе задачі схемотехнічного та конструктивно-морфологічного проектування. Для цього, уявимо, що маємо справу з електричним колом з відомою початковою електричною схемою його реалізації та початковою реальною конструкцією. Виконуючи декомпозицію першого рівня, представимо, електричне коло, у вигляді двох композиційних складових: комунікатора та компонентів. Критерієм такого розбиття на першому ітераційному кроці може слугувати співставлення довжин електромагнітної хвилі, яка випромінюється у простір комунікатором та неавтономними компонентами, і розмірами функціонального перетворювача в цілому. Комунікатор та компоненти характеризується різними математичними моделями, які відбивають ланцюговий (для компонентів) та хвильовий (для комунікатора) процес.

Дескриптори моделі

Серед різноманітних дескрипторів математичної моделі слід розрізняти дескриптори компонентів, дескриптори комунікаторів та дескриптори процесів, що описують електричне коло, як певний функціональний перетворювач.

Дескриптори компонента описуються: власним складеним ім'ям, що може відображати клас компонентів та його індивідуальну специфікацію у цьому класі; параметрами, що мають певну фізичну розмірність (Ом, Гн, Ф тощо); характеристиками (лінійними, параметричними, нелінійними, нелінійно-параметричними); морфологією, яка, в першу чергу, відображає геометричні розміри та електродинамічні (речовинні) параметри (ϵ , μ , σ) зовнішньої поверхні об'єму компонента та інші суттєві для експлуатаційних цілей властивості; математичною моделлю, що описує характеристику на окремій робочій ділянці, яка задається вибором робочої точки та розмахом сигналу, [11]. До речі, імітація нелінійно-параметричного компонента

можлива в такий же спосіб, як і лінійно-параметричного, в режимах середнього та великого сигналів за умови дискретизації та усереднення по часу.

В загальному вигляді дескриптори компонентів повинні описуватись у вигляді скалярних, або операторних матриць, що встановлюють взаємозв'язки між вектором впливів та вектором реакцій дескрипторів процесу. Морфологічні дані про компонент використовуються для розв'язання задач конструкторсько-технологічного характеру: просторового, або площинного розміщення, трасування, рівня електромагнітної автономії, мається на увазі внутрішню та зовнішню електромагнітну, теплову, можливо радіаційну та біологічну сумісність тощо.

Дескриптори комунікатора представляють собою також матриці, що пов'язують між собою впливи та реакції на усіх полюсах комунікатора. Елементи матриць дескрипторів, для яких доречно вжити специфічну назву електродинамічних параметрів, визначаються шляхом розв'язку крайових задач електродинаміки. Слід зауважити, вибір методу розв'язку таких задач також визначається співвідношенням розмірів: хвиля - комунікатор. Як правило, комунікатор має лінійну структуру, що міститься в неоднорідному середовищі. До комунікатора відносять: провідники, екрани, ізоляційні об'єми, що ізолюють дерева комунікатора одне від одного, тощо.

Дескриптори процесів це список фізичних величин, що утворюють множину впливів та реакцій на полюсах (дугах) усіх компонентів та комунікатора. Фізична природа цих дескрипторів обирається в такий спосіб, щоб вони носили системний характер з точки зору поєднання різноманітних етапів проектування в єдине ціле, з метою формування узагальненої для усіх етапів проектування математичної моделі. Системна математична модель і мусить встановити функціональні взаємозв'язки між зазначеними видами дескрипторів у вигляді узгодженої замкнутої системи рівнянь відносно дескрипторів процесу.

Матричні рівняння композиційних складових

Розглянемо окремо три типи рівнянь.

1. Компонентні рівняння:

$$[\mathbf{U}]_m = [\mathbf{Z}]_{m,m} [\mathbf{I}]_m + [\mathbf{U}_0]_m, \quad (1)$$

$$[\mathbf{I}]_m = [\mathbf{Y}]_{m,m} [\mathbf{U}]_m + [\mathbf{I}_0]_m. \quad (2)$$

де $[\mathbf{U}]_m$ та $[\mathbf{I}]_m$ — матриці-стовпці дескрипторів процесів, за які обрано напруги U_m усіх m дуг та струми i_m усіх m полюсів компонента:

$$[\mathbf{U}]_m = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{I}]_m = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Матриці $[\mathbf{U}_0]$, $[\mathbf{I}_0]$ подібні до (3) і характеризують приведені до відповідних дуг та полюсів додаткові напруги та струми, що характеризують активні компоненти. Наприклад, для двополюсника, що містить джерело по-

стійної напруги E з внутрішнім опором R компонентне рівняння матиме вигляд

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ -E \end{bmatrix},$$

де індекси означають струми та напруги відповідних полюсів та дуг компонента. Дескриптори $I_1 = -I_2$; $U_1 = -U_2$ вносять інформаційну збитковість лише в схемотехнічній трактовці, але на конструктивному етапі обліку електромагнітних потоків їх необхідно розрізняти. За відсутності електромагнітних взаємозв'язків між компонентами матриці усього пристрою в цілому складаються з діагональних матриць індивідуальних компонентів, недиагональні матричні блоки при цьому дорівнюють нульовим матрицям.

2. Компонентно-комунікаторні рівняння

Для незалежних дерев

$$[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [i]_{m_{\max}} = [i_H]_{r_{\max}}, \quad (4)$$

де $[D]_{r_{\max}, m_{\max}}$ — матриця дерев, рядки якої відповідають номерам дерев, а стовпці — номерам полюсів компонентів, бінарні елементи матриці, обчислюються за фактом інцидентності m -го полюса r -му дереву D_r , $[i_H]_{r_{\max}}$ — матриця струмів, що не враховані першим законом Кірхгофа [11] (струм зсуву та виток в діелектричне середовище).

Для незалежних контурів

$$[K]_{\rho_{\max}, m_{\max}} [\dot{U}]_{m_{\max}} = [\dot{U}_H]_{\rho_{\max}}, \quad (5)$$

де $[K]_{\rho_{\max}, m_{\max}}$ — матриця контурів, рядки якої відповідають номерам окремих контурів K_p , $p = \overline{1, \rho_{\max}}$, а стовпці — номерам полюсів компонентів, бінарні елементи матриці, обчислюються за фактом інцидентності m -ї дуги p -му контуру K_p , $[\dot{U}_H]_{\rho_{\max}}$ матриця стовпець наведеної в кожному контурі напруги, що не врахована другим законом Кірхгофа [11] (Фарадееві напруги індукції та втрат в провідниках незалежних контурів).

3. Рівняння комунікатора

Праві частини (4), (5), що віддзеркалюють електромагнітні процеси, які невраховані класичними законами теорії електричних кіл

$$[i_H]_{r_{\max}} = [i_G]_{r_{\max}} + [i_C]_{r_{\max}} \quad (6)$$

$$[\dot{U}_H]_{\rho_{\max}} = [\dot{U}_R]_{\rho_{\max}} + [\dot{U}_L]_{\rho_{\max}} \quad (7)$$

де $[i_G]_{r_{\max}}$, $[i_C]_{r_{\max}}$, $[\dot{U}_R]_{\rho_{\max}}$, $[\dot{U}_L]_{\rho_{\max}}$ — матриці стовпці, що виражаються, в свою чергу, через електродинамічні параметри комунікатора, що представляють собою коефіцієнти лінійних комбінацій дескрипторів математичної моделі (3)

$$\begin{aligned} U_{\xi}^{Rd} &= R_{\xi,1}^d * I_1 + R_{\xi,2}^d * I_2 + \dots + R_{\xi,\alpha}^d * I_{\alpha} + \dots + R_{\xi,n}^d * I_n \\ \Phi_{\xi}^d &= L_{\xi,1}^d * I_1 + L_{\xi,2}^d * I_2 + \dots + L_{\xi,\alpha}^d * I_{\alpha} + \dots + L_{\xi,n}^d * I_n \\ I_{\xi}^{Gd} &= G_{\xi,1}^d * U_1 + G_{\xi,2}^d * U_2 + \dots + G_{\xi,\alpha}^d * U_{\alpha} + \dots + G_{\xi,n}^d * U_n \\ N_{\xi}^d &= C_{\xi,1}^d * U_1 + C_{\xi,2}^d * U_2 + \dots + C_{\xi,\alpha}^d * U_{\alpha} + \dots + C_{\xi,n}^d * U_n \end{aligned}$$

нижні індекси відповідають номерам незалежних контурів для «струмових» R, L параметрів та, відповідно — незалежних дерев для «напругових» G, C параметрів. З цих рівнянь зокрема впливає і спосіб формулювання задачі електродинаміки по їх визначенню, наприклад, параметр $L_{\xi,\alpha}^d$ дорівнює магнітному потоку Φ_{ξ}^d , що пронизує ξ -й контур, за умови, що струм полюса α $I_{\alpha} = 1$, а струми решти полюсів компонентів є нульовими. При цьому слід мати на увазі, що реально джерелами магнітного потоку не є струм полюса, що не має геометричних характеристик. Струм полюса α є лише опосередкованим джерелом реальних струмів полюсів комунікатора, тобто безпосередніх джерел магнітного потоку, які мають просторово часову залежність. В точках зчленування струм полюса компонента дорівнює струму полюса дерева комунікатора. Разом з тим, слід зауважити, що поняття струму та напруги не є однозначними в вихровому електромагнітному полі, з чого випливає, що в місцях з'єднання компонентів та комунікатора електромагнітна хвиля повинна мати поперечну T-структуру. Лише за цих умов в вікнах енергообміну (компонент-комунікатор) можна однозначно вводити дескриптори струм та напруга. За інших умов слід користуватись універсальними дескрипторами, типу потужність, вектор Герца, вектор Пойтінга та S-параметри.

Очевидно, що обчислення електродинамічних параметрів можливо на основі вибору рівня ідеалізації комунікатора, що залежить від співвідношення, з одного боку, довжини електромагнітної хвилі, що породжується струмами провідників і зарядами дерев комунікатора та геометричними розмірами самого комунікатора, з іншого боку. Таким чином, незалежно від рівня ідеалізації в лінійному середовищі електродинамічні параметри представляють собою коефіцієнти пропорційності лінійної комбінації обраних в математичній моделі дескрипторів (3).

Узагальнена математична модель

Аналізуючи (1)...(7) неважко отримати замкнуту систему рівнянь відносно дескрипторів процесу у вигляді

$$[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}} X_{4m_{\max}}^A = B_{4m_{\max}}, \quad (8)$$

де $X_{4m_{\max}}^A$ — матриця стовпець невідомих, наприклад, струми та напруги компонентів та комунікатора (дескрипторів процесу); m_{\max} — кількість по-

люсів; $[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}}$ та $B_{4m_{\max}}$ — матриці, елементи яких обчислюються через параметри компонентів та комунікатора.

Подання (8) в блочному вигляді

$$[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}} = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & A14 \\ A21 & A22 & A23 & A24 \\ A31 & A32 & A34 & A34 \\ A41 & A42 & A43 & A44 \end{bmatrix}; \quad B_{4m_{\max}} = \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

дозволяє розробляти різноманітні класи задач аналізу монолітних інтегральних схем в широкому діапазоні частот не змінюючи при цьому загальну структуру математичного забезпечення систем проектування.

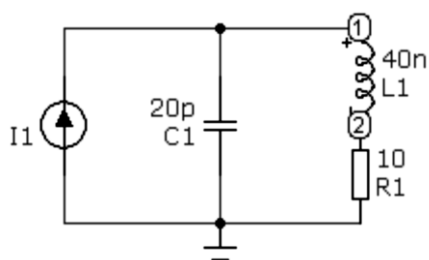


Рис. 1. Електрична схема резонансного контуру

На підтвердження достовірності отриманих результатів виконано аналіз резонансного контура, рис. 1, в середовищі MathCad 14. Результати аналізу амплітудної та частотної характеристики контура, рис. 2, співпадають з результатами аналізу контура в пакеті MicroCap 9, що свідчить про достеменність результатів. На користь такого ж висновку говорить можливість зведення даної моделі до відомих класичних методів аналізу електричних кіл типу контурних струмів, вузлових потенціалів, тощо, у разі відсутності електромагнітного впливу комунікатора на частотні характеристики контура. Цілком очевидно, що з підвищенням частоти, електродинамічні параметри контура перестають бути нульовими і відповідним чином змінюють результати, рис. 2.

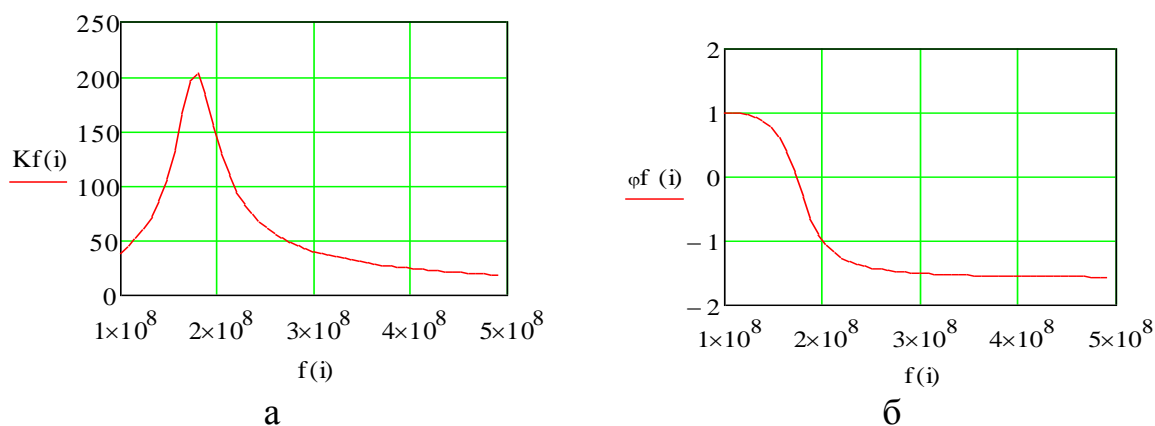


Рис. 2. Частотні характеристики: а — амплітудна; б — фазова.

Характер змін залежатиме від морфологічних особливостей конструкції та вибору рівня ідеалізації розв'язку електродинамічних задач по обчисленню втрат в провідниках та ізоляційних середовищах і потоків вектора магнітної та електричної індукції.

Цілком очевидно також, що дана модель орієнтована на розробку комп'ютерних систем проектування електронних засобів в нанотехнологіях та інших електронних високочастотних пристроїв.

Висновки

Запропоновані нові підходи до способу побудови математичних моделей аналізу електронних засобів. На основі декомпозиції виокремлюються перетворювачі енергії (компоненти) та структура провідників (комунікатор), що їх об'єднує. Окремо для компонентів (1), (2) та комунікатора (6), (7) складаються матричні рівняння, що відображають їх внутрішні фізичні процеси. Об'єднання (топология схеми) зазначених композиційних складових моделюється рівняннями (4), (5), як аналогами рівнянь Кірхгофа що дозволяють відтворювати вплив електромагнітних полів комунікатора.

Перетворення зазначених рівнянь в єдину математичну модель (8), (9) відносно вектора невідомих (струми та напруги усіх компонентів та дерев комунікатора) дозволяє розробку системних методів аналізу високочастотної, в тому числі і нанотехнологічної електроніки.

Література

5. Кагадей В. Технологии будущего: наноматериалы и наноэлектроника [Электронный ресурс] // В. Кагадей: ЗАО «НПФ «Микран»; О. Хасанов: Томский политехнический университет // <http://www.youtube.com/watch?v=VDJA93OSXrI> Загружено – 29 ноября 2011
6. [Электронный ресурс] // ТУСУР: Ролик к томскому инновационному форуму. Наноэлектроника <http://www.youtube.com/watch?v=J-Ov3UtLsMo> Загружено – 25 мая 2010
7. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами (справочное пособие). — М. : Наука, 1979, 224 с.
8. Князь А. И. Электродинамика информационных систем. — М. : Радио и связь, 1994. — 392 с.
9. Князь А. И. Электродинамически обоснованные схемотехнические модели параметрического видеусилителя / А. И. Князь, В. Г. Кудря // “Радиотехника”, — М. : Радио и связь. 1985, — №6, — с. 87–88.
10. Кудря В. Г. Моделирование электромагнитных перешкод комунікатора електронної апаратури діапазону частот 0,03...3 ГГц.// В кн.: Труды третьей международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" — Одесса: СИЭТ-2002, — 2002. — С. 52
11. Тозони О. В. Электродинамические итерации при проектировании ЭВМ. / О. В. Тозони, А. И. Князь // “Электронное моделирование” — Киев: “Наукова думка”, 1979. — №2, — С. 57 – 63.
12. Жоаким К. Нанонауки. Невидимая революция. / К. Жоаким, Л. Плеввер // М. : Колибри, 2009. — 235 с.
13. Иллюстрированная хроника открытий и изобретений // М. : Астрель, 2002.
14. Уилкенсон Д. Фундаментальная структура материи. / Д. Уилкенсон и др., под ред. Малви Дж. // (Рус. перевод под ред. А.Д. Суханова) — М. : Мир, 1984. — 312 с.
15. Кудря В. Г. Основы электротехники та електроніки // Одеса: ОДЕКУ, 2008. — 123 с.

References

1. Kaghadej V. Tekhnologhyu budushhegho: nanomateryaly y nanoelektronnyka [Elektronnyj resurs] // V. Kaghadej: ZAO «NPF «Mykran»; O. Khasanov: Tomskij polytekhnycheskij unyversytet // <http://www.youtube.com/watch?v=VDJA93OSXrI> Zaghruzheno – 29 nojabrja 2011
2. [Elektronnyj resurs] // TUSUR: Rolyk k tomскому ynnovacyonnomu forumu. Nanoelektronnyka <http://www.youtube.com/watch?v=J-Ov3UtLsMo> Zaghruzheno – 25 maja 2010
3. Butkovskij A.Gh. Kharakterystyky system s raspredelënnymy parametramy (spravochnoe posobyje). – M.: Nauka, 1979, 224 s.
4. Knjazj A.I. Elektrodynamyka informatsionnykh system. - M.: Radio y svjazj, 1994. – 392 s. Elektrodynamycheski obosnovannye skhemotekhnnycheskie modeli parametriceskogho videousitelja / A .Y. Knjazj, V. Gh. Kudrja // “Radiotekhnika”, — M.: Radio i svjazj. 1985, №6, s. 87-88.
5. Elektrodynamycheski obosnovannye skhemotekhnnycheskie modeli parametriceskogho videousitelja / A .Y. Knjazj, V. Gh. Kudrja // “Radiotekhnika”, — M.: Radio i svjazj. 1985, №6, s. 87-88.
6. Kudrja V.Gh. Modeljuvannja elektromagnitnykh pereshkod komunikatora elektronnoj aparatury diapazonu chastot 0,03...3 GhGhc.// V kn.: Trudy tretjej mezhdunarodnoj nauchno-praktycheskoj konferencyy "Sovremennye ynformacyonnye y elektronnyye tekhnologhyu" — Odessa: SYЭT-2002, 2002. S. 52
7. Tozoni O.V. Elektrodinamicheskie iteracii pri proektirovanii EVM. / O. V. Tozoni, A. I. Knjazj // “Elektronnoe modelirovanie”, Kiev: Naukova dumka”, 1979. №2, s. 57 – 63.
8. Zhoakim K. Nanonauki. Nevidimaja revoljucija. / K. Zhoakim, L. Plever // M.: Kolibri, 2009. - 235 s.
9. Iljustrirovannaja khronika otkrytij i izobretenij // M.: Astrelj, 2002.
10. Uilkenson D. Fundamentaljnaja struktura materii. / D. Uilkenson i dr., pod red. Malvi Dzh. // (Rus. perevod pod. red.. A.D. Sukhanova) - M.: Myr, 1984. 312 s.
11. Kudrja V.Gh. Osnovy elektrotekhniky ta elektroniky // Odesa: ODEKU, 2008. 123 s.

Кудря В. Г. Моделирование швидкодіючих електронних пристроїв. Пропонуються методи аналізу високочастотних електронних засобів, що можуть бути застосовані при проектуванні монолітних інтегральних схем. Розроблені математичні моделі аналізу дозволяють проводити оцінки електромагнітних взаємовпливів неавтономних компонентів та комунікаційних структур у випадку їх взаємодії один з одним. Запропоновані моделі, в першу чергу, спрямовані на побудову системної САПР наноелектроніки.

Ключові слова: моделювання в наноелектроніці, високочастотна електроніка, електромагнітні перешкоди.

Кудря В. Г. Моделирование быстродействующих электронных устройств. Предлагаются методы анализа высокочастотных электронных средств, которые могут быть применены при проектировании монолитных интегральных схем. Разработаны математические модели анализа позволяют проводить оценки электромагнитных взаимовлияний неавтономных компонентов и коммуникационных структур в случае их взаимодействия друг с другом. Предложенной модели, в первую очередь, направлены на построения системной САПР нанoeлектроники.

Ключевые слова: моделирование в нанoeлектронике, высокочастотная электроника, электромагнитные помехи

*Kudrya V. G. **High-speed electronic devices modeling.***

Introduction. The theme of this publication is the modeling of electronic tools that operate in the frequency range from zero to terahertz and higher. Application of new concepts and technologies, including biotechnology and nanotechnology, in the development of monolithic integrated circuits led to a backlog of technologies of projecting from technologies and experimental research and manufacturing. The aim of this work is to develop algorithms for analysis, reflecting not only topological as well as morphological properties of the object, that is designing within the framework of accounting EMI communicational transmission of energy and information in the volume of the monolithic integrated circuit.

Basic steps for constructing the algorithm. The object of design is presented in the form of basic elements, which can be combined with a communication structure. The object of design is presented in the form of basic elements, which can be combined with a communication structure.

There are three types of matrix equations: component; component - communication structure; communication structure. Systems of equations are reduced to standardized descriptors of mathematical model that are current of poles and voltage arcs whole set of basic elements. In this way mathematical model that can be implemented in CAD nano and micro technology electronics is obtained.

Conclusions. Mathematical models of analysis of high-speed digital and analog electronic tools are designed. The algorithm allows to carry out the morphological optimization, namely to minimize the adverse effects outside the system of electromagnetic interaction between the components and communicator.

***Keywords:** simulation in nanoelectronics, high-frequency electronics, electromagnetic interference.*