

УДК 621.319.7.011.7

В.Г. Кудря, канд. техн. наук,
Ю.О. Лемехов, спеціаліст,
Одес. держ. акад. холоду

ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КОМУНІКАТОРА

В.Г. Кудря, Ю.О. Лемехов. **Формулювання задач електродинаміки для розрахунку параметрів комунікатора.** Формулюються задачі розрахунку впливу електростатичного поля комунікатора на частотні характеристики електричного кола. Встановлено, що на частотах понад 10^{10} Гц, такий вплив вельми істотний, і приріст струму складає 50 % та вище. Врахування конструктивних особливостей дозволило підвищити точність моделювання електричного кола.

Ключові слова: комунікатор, електричне поле, внутрішні електромагнітні перешкоди.

В.Г. Кудря, Ю.А. Лемехов. **Формулирование задач электродинамики для расчета параметров коммуникатора.** Формулируются задачи вычисления влияния электростатического поля коммуникатора на частотные характеристики электрической цепи. Установлено, что на частотах, превышающих 10^{10} Гц, такое влияние весьма существенно, и прирост тока составляет 50 % и выше. Учет конструктивных особенностей позволил повысить точность моделирования электрической цепи.

Ключевые слова: коммуникатор, электрическое поле, внутренние электромагнитные помехи.

V.G. Kudrya, Yu.A. Lemekhov. **The electrostatic field influence on electric circuit's frequency characteristics are formulated.** The calculation tasks of the communicator electrostatic field influence on electric circuit's frequency characteristics are formulated. It is found that when frequencies are above 10^{10} Hz, the effect is quite considerable and the current increases above 50%. The electrical circuit modeling accuracy improvement is allowed by considering constructional features.

Keywords: communicator, electric field, internal electromagnetic interference.

Розвиток наноелектроніки нерозривно пов'язаний з активним освоєнням високочастотних діапазонів, що, в свою чергу, пов'язане з внутрішньою електромагнітною сумісністю нанотехнологічної апаратури. Технології нановиробів, як правило, недостатньо повно узгоджуються з математичними моделями їх проектування. Струмopовідні з'єднувачі компонентів характеризуються певними геометрикоморфологічними властивостями, врахування яких суттєво впливає на якість нановиробу. Не можна стверджувати, що існують системні математичні моделі, які задовольняють вимогам системного проектування технологічних процесів створення електронних нанопродуктів.

Принципам системності проектування приділяли увагу низка як вітчизняних [1, 2], так і закордонних фахівців. Разом з тим, результати зазначених робіт містять переважно теоретичний характер, тобто практика їх застосування при проектуванні нановиробів відсутня. Тому розробка ефективних та електродинамічно обґрунтованих моделей електричних кіл, застосування яких дасть можливість збільшити швидкодію та поліпшити надійність нановиробів, що розробляються, є важливою. Пропонується використання електродинамічно обґрунтованих моделей; побудова алгоритмів обчислення елементів матриці електродинамічних параметрів комунікатора; формулювання задач електродинаміки для врахування параметрів комунікатора; постановка задач електродинаміки для обчислення інтегральних потоків векторів індукції в магнітному, електростатичному та провідному середовищах в їх прив'язці до морфології мікросхеми.

Електродинамічно обґрунтована модель заснована на уявленні електричного кола (ЕК) у вигляді сукупності компонентів та комунікатора [3, 4]. Тому розробку інтегральної нанохетнологічної схеми можна звести до проектування конструкції комунікатора і вибору номіналів компонентів. Розглянемо більш ретельно лише комунікатор як джерело електромагнітних перешкод та взаємовпливів.

Характеристики комунікатора залежать від геометричних характеристик об'єкта [1]. Але поняття напруги та струму в класичній теорії кіл не є функціями просторових координат. Саме тому ці поняття в електродинамічно обґрунтованій моделі слід визначати в трьох змістовних навантаженнях: напруги дуг (струми полюсів) компонентів; напруги (струми) між деревами комунікатора; напруги (струми) вздовж провідників комунікатора. В електродинаміці напругу між просторовими точками a і b визначають як криволінійний інтеграл по шляху l_{ab}

$$u_{ab}(t) = \int_a^b \vec{E} d\vec{l} = \vec{l} \vec{E}_{cp-1}, \quad (1),$$

де \vec{E} — напруженість електричного поля, В/м;

\vec{l} — вектор, початок якого визначається координатою a , а кінець — b , м;

l_{ab} , — траєкторія шляху інтегрування в (1), м;

\vec{E}_{cp-1} — вектор середньої напруженості електричного поля по довжині шляху інтегрування.

Вибір траєкторії інтегрування на зазначених частотах може суттєво впливати на значення інтегралу (1), якщо поле не потенціальне. Тобто напруга як така може бути і неоднозначною. Струм в провідному середовищі визначають як

$$i_a(t) = \gamma \int_S \vec{E} d\vec{S} = \gamma \vec{S} \vec{E}_{cp-S},$$

де γ — питома провідність, См/м;

\vec{E}_{cp-S} — середня напруженість електричного поля по площині;

\vec{S} — поверхня перетину провідника, де напрям вектора \vec{S} визначається як середній напрям по всіх $d\vec{S}$, на які розбивається поверхня інтегрування;

$d\vec{S}$ — вектор одиничної довжини, ортогональний до зовнішньої поверхні \vec{S} в точці інтегрування, м².

Щоб розрахувати струм провідності для провідника комунікатора, треба взяти криволінійний інтеграл по поверхні S , м², що є поверхнею перетину провідника. Струм провідності тече в цьому провіднику перпендикулярно до поверхні S [5]:

$$\vec{I}_{пр} = \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

де \vec{j} — вектор щільності струму провідності, А/м²;

S — довільна поверхня, яка спирається на контур Γ , м²;

$dS = n_0 dS$,

n_0 — орт нормалі до поверхні S (рис.1).

Струм зсуву обчислюється за наступною формулою

$$\vec{I}_{зс} = \int_S \vec{j}_{зс} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S},$$

де $\vec{j}_{зс}$ — вектор щільності струму зсуву, А/м²;

\vec{D} — вектор електричної індукції, Кл/м².

Повний струм в інтегральній формі

$$\vec{I}_{пов} = \int_S \vec{j} d\vec{S} - \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Рівняння для дерев комунікатора у комплексній формі мають такий вигляд

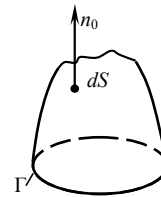


Рис. 1. Замкнений контур Γ , на який спирається поверхня S

$$\sum_{\text{дерево}} \dot{\mathbf{I}}_k(t) = -\dot{\mathbf{I}}_H,$$

де $\dot{\mathbf{I}}_k$ — струм комунікатора, А;

$\dot{\mathbf{I}}_H$ — наведений (паразитний, паранормальний) струм, що складається зі струму $\dot{\mathbf{I}}_3$ зсуву та струму витоку $\dot{\mathbf{I}}_B$, А.

Сумарний струм з окремого дерева комунікатора

$$\sum_{k=1}^n \dot{\mathbf{I}}_k + \dot{\mathbf{I}}_B + \dot{\mathbf{I}}_3 = 0.$$

Додаткові напруги, що імітують вплив комунікатора, враховують в кожному незалежному контурі [5]. Для кожного окремого контура

$$\sum_{\text{контур}} \dot{U}_k = -\dot{U}_H, \quad (2)$$

де \dot{U}_H — напруга незалежного контура, В;

$$\dot{U}_H = \dot{U}_L + \dot{U}_R \quad (3)$$

де \dot{U}_R — напруга на опорах монтажних провідників, В;

\dot{U}_L — наведена напруга контура, В.

Безпосередніми джерелами силових ліній магнітного поля, що створюють напругу \dot{U}_L , є струми дерев, які також створюють і омічне падіння напруг \dot{U}_R на відрізках провідників дерев комунікатора [5].

Для досягнення мети дослідження трансформуємо рівняння (1)...(3) з тим, щоб на основі геометричних характеристик комунікатора сформулювати задачу електродинаміки та вказати шляхи її розв'язання.

Характеризувати роботу комунікатора можливо введенням параметрів, на штатт первинних параметрів довгої лінії [5] R, L, C та G

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_C &= -j\omega S_6 \bar{\mathbf{D}}_{\text{cp}_S} = -j\omega \dot{N}; \\ \dot{\mathbf{I}}_G &= \gamma_d S_6 \dot{E}_{\text{cp}_S} = G\dot{U}; \\ \dot{U}_L &= j\omega S_k \mathbf{B}_{\text{cp}_S} = j\omega \dot{\Phi}; \\ \dot{U}_R &= \sum_{\Delta l} \int \bar{\mathbf{E}} d\bar{\mathbf{l}} = RI, \end{aligned} \quad (4)$$

де $j = \sqrt{-1}$,

$\dot{\mathbf{I}}_C$ — струм зсуву, А;

S_6 — бічна поверхня провідника-дерева, м²;

ω — частота синусоїдального джерела, Гц;

$\bar{\mathbf{D}}_{\text{cp}_S}$ — вектор електричної індукції (його середнє значення на поверхні S_6), Кл/м²;

\dot{N} — електричний потік (потік вектора електричної індукції з поверхні S_6), В/м;

$\dot{\mathbf{I}}_G$ — струм, що проходить скрізь діелектрик, А;

γ_d — питома провідність діелектрика, См/м;

\dot{E}_{cp_S} — середнє значення напруженості електричного поля, В/м;

\dot{U} — комплексна напруга контура, В;

G — провідність діелектрика між деревами комунікатора, 1/Ом м;

\dot{U}_L — комплексна напруга, яка наводиться в контурі комунікатора, В;

S_k — площа, що охоплюється контуром, м²;

$\dot{\mathbf{B}}_{cp_S}$ — середнє значення вектора магнітної індукції, Тл, що пронизує контур S_k ;

$\dot{\Phi}$ — магнітний потік, що пронизує контур, Вб;

\dot{U}_R — омична напруга на провідникові, В;

RI — падіння напруги на проводах комунікатора;

\dot{E} — напруженість електричного поля вздовж провідника, В/м;

\dot{I} — струм, що протікає по провіднику комунікатора, А;

R — омична напруга провідника, Ом;

$d\bar{\mathbf{I}}$ — орт дотичної (вектор);

$\int_{\Delta l} \bar{\mathbf{E}} d\bar{\mathbf{I}}$ — криволінійний інтеграл, що визначає додаткову омичну напругу на провідникові

довжиною Δl , м.

Слід зауважити, що формули стосуються замкнутих поверхонь дерев та замкнутих контурів комунікатора.

Враховуючи (4), наведений струм можна представити у вигляді

$$\dot{\mathbf{I}}_H = -j\omega\dot{N} + \dot{U}G = \left(-j\omega + \frac{\dot{U}G}{\dot{N}}\right)\dot{N} = \left(-j\omega + \frac{G}{C}\right)\dot{N} = (G - j\omega C)\dot{N}_C, \quad (5)$$

де N_C — потік з замкнутої поверхні дерева вектора індукції електричного поля, що припадає на одиницю ємності, В/м

$$\dot{U}_H = \dot{U}_R + j\omega\dot{\Phi} = \left(\frac{\dot{I}}{\dot{\Phi}}R + j\omega\right)\dot{\Phi} = \left(\frac{R}{L} + j\omega\right)\dot{\Phi} = (R + j\omega L)\Phi_L, \quad (6)$$

де L — індуктивність;

Φ_L — потік вектора магнітної індукції через поверхню замкнутого контура, що приведений до одиниці індуктивності, Вб.

В формулах (5) і (6) коефіцієнти пропорційності між приведеними потоками та лівими частинами називають комплексними параметрами дерев Y і контурів Z комунікатора електричного кола

$$Y = G - jB; \quad Z = R + jX,$$

де $B = \omega C$; $X = \omega L$;

ω — циклічна частота;

C — ємність комунікатора;

X — реактивний опір.

Їх подання в матричній формі характеризує математичну модель комунікатора. До її складу входять так звані матриці електродинамічних параметрів комунікатора. Алгоритмізація та формулювання задач з обчислення цих параметрів складає певні труднощі, що пов'язані зі стикуванням ланцюгових та електродинамічних задач. Один з можливих способів розв'язання цієї задачі ілюструється на прикладі обчислення електростатичних параметрів.

Зокрема, для електричного кола, що характеризується кількістю дерев r , для кожного окремого j -го дерева можна записати, що алгебраїчна сума струмів полюсів дерева $i_{j,k}$ витоків $i_{j,G}$ та струмів зсуву $i_{j,C}$ задовольняє рівнянню

$$\sum_{k=1}^j i_{j,k} = -(i_{j,G} + i_{j,C}); \quad \forall j = 1 \dots d. \quad (7)$$

Рівність (7) дозволяє застосувати матричну форму запису, що має вигляд

$$\mathbf{D}_{r,M} \mathbf{i}_{M,I} = -\mathbf{i}_{G,r,1} - \mathbf{i}_{C,r,1}, \quad r = d - 1, \quad (8)$$

де r — кількість незалежних дерев, тобто дерев, що описуються незалежними рівняннями виду (8);

$\mathbf{i}_{M,1}$ — матриця струмів полюсів компонентів;

$\mathbf{i}_{G_{r,1}}$ — матриця струмів витоку з кожного окремого дерева на базове дерево, що має нульовий потенціал;

$\mathbf{i}_{C_{r,1}}$ — матриця струмів зсуву з кожного окремого дерева на базове дерево, що має нульовий потенціал [5].

Матрицю $\mathbf{D}_{r,M}$, що містить r рядків та M стовпчиків, називають матрицею незалежних дерев комунікатора. Її елементи формуються за правилом: елемент з індексами (k, p) дорівнює нулю, якщо p -й полюс компонента не інцидентний до k -го дерева і одиниці — у випадку інцидентності p -го полюса k -му дереву.

Друга складова правої частини (8), що створюється струмами зсуву, визначається як лінійна комбінація

$$\mathbf{i}_{C_{r,1}} = \mathbf{C}_{r,M} \mathbf{u}_{M,1},$$

похідних напруг дуг компонентів, тобто Матриця вектора струму зсуву

$$\mathbf{i}_{C_{r,1}} = \mathbf{C}_{r,M} \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{M,1}, \quad (9)$$

де $\mathbf{C}_{r,M} \cdot \mathbf{u}_{M,1}$ відображає потік вектора електричної індукції $\mathbf{N}_{r,1}$.

Отже, рівняння комунікатора у символічному вигляді мають вигляд

$$\mathbf{D}_{r,M} \dot{\mathbf{i}}_{M,1} = \dot{\mathbf{i}}_{H_{M,1}},$$

де наведені на деревах струми

$$\dot{\mathbf{i}}_{H_{r,1}} = -\dot{\mathbf{i}}_{G_{r,1}} - \dot{\mathbf{i}}_{C_{r,1}}. \quad (10)$$

Таким чином, як впливає з (10), потік вектора електричної індукції N_k для фіксованого моменту часу з k -го дерева визначається як

$$\mathbf{N}_k = C_{k1}U_1 + C_{k2}U_2 + \dots + C_{km}U_m + \dots + C_{kr}U_r, \quad (11)$$

де C_{km} — шуканий електростатичний елемент матриці (11);

U_m — напруга m -ї дуги певного компонента електричного кола.

Формула (11) дозволяє обчислити параметр C_{km} , якщо покласти усі, окрім U_m , напруги такими, що дорівнюють нулю, а, наприклад, $U_m = 1$, В. В цьому випадку потік $\mathbf{N}_k = C_{km}$, що дозволяє сформулювати задачу електродинаміки за визначенням цього потоку. Стає очевидним той факт, що C_{km} — параметр, який встановлює взаємозв'язок між напругою дуги компонента (без геометричних розмірів) та потоком з дерева N_k , що характеризується геометричними (морфологічними) ознаками.

Отже, для того, щоб коректно сформулювати задачу електродинаміки за (11), треба конкретизувати джерело електричного потоку N_k (поверхню дерева) та визначити розподіл зарядів по його поверхні за умови розподілу потенціалів між k -м деревом та рештою дерев, що задаються напругою U_m дуги певного компонента. При цьому може мати місце певна надмірність та неоднозначність визначення решти параметрів, яка може бути усунута на основі рівності певних напруг та довільним перерозподілом значень C_{km} , де $1 \leq k, m \leq r$.

В загальному випадку представлені міркування властиві алгоритмізації визначення і решти електродинамічних параметрів комунікатора за умови визначення потоків векторів індукції

електромагнітних полів в електричному, магнітному та провідному середовищах (4). Для цього необхідно вказати геометричні джерела, тобто струми та напруги компонентів, якими опосередковано визначаються вектори \dot{D}_{cp_S} , \dot{E}_{cp_S} , \dot{B}_{cp_S} .

Як приклад розглянемо елементарне електричне коло, де комунікатор (верхній та нижній провідники), має вигляд пластин (друковані доріжки), що розташовані в одній площині (рис. 2). Розміри пластин a — довжина, b — ширина та відстань між центрами пластин d . Комунікатор складається з двох дерев і у відповідності з (8) ($r=1$), що дозволяє потік вектора електричної індукції (11) представити як

$$N_1 = C_{11}U_1 + C_{12}U_2 + C_{13}U_3 + C_{14}U_4$$

де U_1, U_2 — напруги дуг джерела;

U_3, U_4 — напруги дуг резистора;

$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$ — власна та взаємні часткові ємності [7].

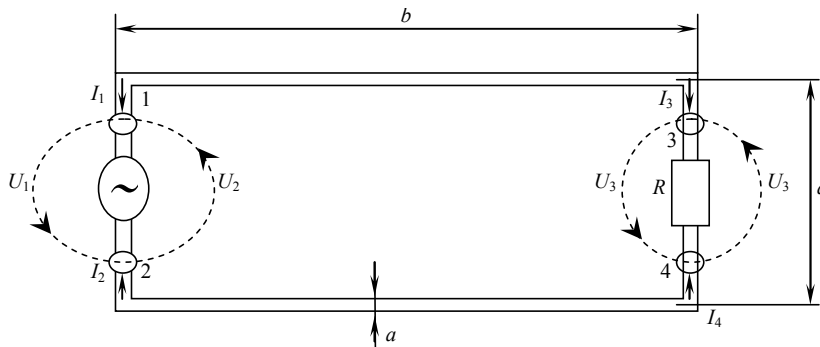


Рис. 2. Електричне коло: a — довжина пластини, b — ширина пластини, d — відстань між центрами пластин

У відповідності з рисунком 2

$$U_1 = U_3; U_2 = U_4, \text{ і } U_1 = -U_2; U_3 = -U_4,$$

що спрощує вираз для потоку N_1

$$N_1 = (C_{11} - C_{12} + C_{13} - C_{14})U_1 = CU_1,$$

де $C = C_{11} - C_{12} + C_{13} - C_{14}$.

Це узагальнений ємнісний параметр комунікатора, який можна визначити розв'язуючи задачу електродинаміки. Таким чином, ланцюгова задача з визначення електродинамічного ємнісного параметра звелась до крайової задачі теорії електромагнітного поля (задача Діріхле) [6], в результаті розв'язання якої отримують потік вектора електричної індукції з поверхні дерева

$$N = \oint_{S_6} \vec{D} d\vec{S},$$

де S_6 — замкнута поверхня дерева.

Точне розв'язання задачі в загальному випадку неможливо виконати внаслідок складних форм поверхонь дерев комунікатора. Тому в багатьох випадках застосовують наближені методи обчислення потоків. Подаючи комунікатор, (див. рисунок 2) у вигляді двопровідної лінії, що характеризується розмірами $a = 0,02$ м; $b = 0,2$ м та відстанню між пластинами $d = 0,5$ м, скориставшись формулою [7],

$$\frac{C_l}{2\pi\epsilon} \approx \left(\ln \frac{d^2}{a_1 a_2} \right)^{-1},$$

де для нашого випадку $a_1=a_2=a/2=0,01$ м, а ємність між проводами довжиною 0,2 м визначається C

$$C \approx \frac{\pi \epsilon b}{\ln \frac{d}{a}}, \quad (12)$$

де $\epsilon = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ Ф/м.

Обчисливши ємність за формулою (12) $C \approx 1,42 \cdot 10^{-12}$ пФ побудуємо графіки залежності струму, що тече через генератор від частоти, за умови $U=10$ В; $R=10$ Ом (рис. 3).

Один з графіків $I_0(f)$ не враховує впливу комунікатора (крива 1), а інший $I(f)$ — враховує потік вектора електричної індукції, про що свідчить монотонне зростання величини струму зі зростанням частоти (крива 2).

Аналогічно можна формулювати та розв'язувати задачі з обліку інших параметрів комунікатора, що імітують магнітний потік, омичні втрати в проводах комунікатора та втрати в діелектричному середовищі, що містить комунікатор.

Таким чином, виконано розрахунок впливу ємнісного параметра комунікатора елементарного електричного кола на частотні характеристики струму, що суттєво відрізняються в режимах врахування та нехтування внутрішнього електромагнітного стану. Приведені алгоритми обчислення елементів матриці електродинамічних параметрів комунікатора дозволяють враховувати конструктивні особливості нановиробу на схемотехнічному етапі його проектування, що забезпечує підвищення точності проектування морфологічних структур комунікаторів електронних засобів нанотехнологічного виробництва.

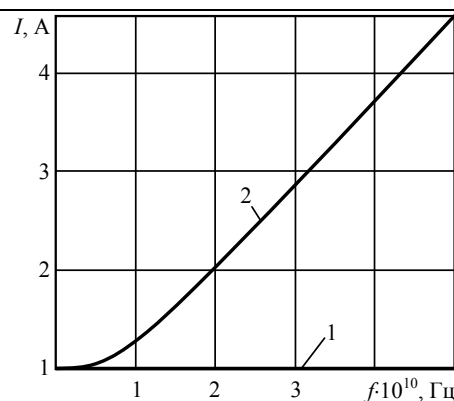


Рис. 3. Залежність струмів від частоти: без впливу комунікатора (1), з відображенням впливу комунікатора (2)

Література

1. Князь, А.И. Электродинамика информационных систем / А.И. Князь. — М.: Радио и связь, 1994. — 392 с.
2. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом ЭМС / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. — М.: Радио и связь, 1989. — 224 с.
3. Тозони, О.В. Метод вторичных источников в электротехнике / О.В. Тозони. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
4. Тозони, О.В. Электродинамические итерации при проектировании ЭВМ / О.В. Тозони, А.И. Князь // Электрон. моделирование. — 1979. — № 2. С. 57 — 63.
5. Кудря, В.Г. Моделивання електромагнітних взаємовпливів функціональних перетворювачів / В.Г. Кудря, Ю.О. Лемехов // Холодил. техніка та технологія / ОДАХТ. — Одеса, 2010. — № 2. — С. 66 — 73.
6. Вольман, В.И. Техническая электродинамика / В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. — М.: Связь, 2000. — 487 с.
7. Иоссель, Ю.А. Расчет электрической емкости / Ю.А. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. — 2-е изд. перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 288 с.

References

1. Knyaz', A.I. Elektrodinamika informatsionnykh sistem [Electrodynamics of information systems] / A.I. Knyaz'. — Moscow, 1994. — 392 pp.
2. Knyazev, A.D. Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno-vychislitel'noy apparatury s uchedom EMS [Design of electronic radio and computing equipment with regard for EMC] / A.D. Knyazev, L.N. Kechiev, B.V. Petrov. — Moscow, 1989. — 224 pp.
3. Tozoni, O.V. Metod vtorichnykh istochnikov v elektrotekhnike [Secondary source method in electrical engineering] / O.V. Tozoni. — Moscow, 1975. — 296 pp.

4. Tozoni, O.V. Elektrodinamicheskie iteratsii pri proektirovanii EVM [Electrodynamic iterations in computer design] / O.V. Tozoni, A.I. Knyaz' // Elektron. modelirovanie. [Electronic modeling] — 1979. — # 2. — P. 57 — 63.
5. Kudria, V.H. Modeliuvannia elektromagnitnykh vzaiemovplyviv funktsionalnykh peretvoriuvachiv. [Modeling of electromagnetic interactions in functional generators] — / V.H. Kudria, Yu.O. Liemiekhov // Kholodyl. tekhnika ta tekhnolohiia [Refrigerating engineering and technology] / ODAKhT. [OSART] — Odesa, 2010. — # 2. — P. 66 — 73.
6. Vol'man, V.I. Tekhnicheskaya elektrodinamika [Engineering electrodynamic] / V.I. Vol'man, Yu.V. Pimenov. — Moscow, 2000. — 487 pp.
7. Iossel', Yu.A. Raschet elektricheskoy emkosti [Electric capacitance calculation] / Yu.A. Iossel', E.S. Kochanov, M.G. Strunskiy. — 2-e izd. pererab i dop. [2-nd edition] — Leningrad, 1981. — 288 pp.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. держ. акад. холоду Князева Н.А.

Надійшла до редакції 10 березня 2011 р.