

УДК 621.319.74

Ю.О. Лемехов, спеціаліст, Одес. нац. акад. харч.
технологій

АВТОНОМНИЙ ТА НЕАВТОНОМНИЙ СТАН КОМУНІКАТОРА

Ю.О. Лемехов. Автономний та неавтономний стан комунікатора. Приведено методи аналізу високочастотних електричних кіл, в яких суттєву роль відіграють внутрішні та зовнішні електромагнітні перешкоди, джерелом яких є комунікатор як композиційна складова, що має достатньо великі, у порівнянні з зосередженими компонентами, розміри. Пропонуються моделі комунікатора в автономному та неавтономному станах. Вони дозволяють виконувати аналіз швидкодіючих аналогових та цифрових електричних кіл з урахуванням не лише топологічної конфігурації, а і морфологічних властивостей, що відображають конструктивні особливості на схемотехнічному етапі проектування комунікаторів.

Ключові слова: комунікатор, внутрішні електромагнітні перешкоди, морфологія електронних пристроїв.

Ю.А. Лемехов. Автономное и неавтономное состояние коммунікатора. Приведены методы анализа высокочастотных электрических цепей, в которых важную роль играют внутренние и внешние электромагнитные помехи, источником которых является коммунікатор как композиционная составляющая, имеющая достаточно большие, по сравнению с сосредоточенными компонентами, размеры. Предлагаются модели коммунікатора в автономном и неавтономном состояниях. Они позволяют выполнять анализ быстродействующих аналоговых и цифровых электрических цепей с учетом не только топологической конфигурации, но и морфологических особенностей, отображающих конструктивные особенности на схемотехническом этапе проектирования коммунікаторов.

Ключевые слова: коммунікатор, внутренние электромагнитные помехи, морфология электронных устройств.

Yu.A. Lemekhov. Independent and off-independent condition of a communicator. Methods of analyzing high-frequency electric circuits in which the important role is played by the internal and external electromagnetic interference, the source of which is the communicator as the composite component having large enough, compared to lumped components, dimensions, are adduced. Communicator models in independent and off-independent conditions are offered. They allow to analyze high-speed analog and digital electric circuits considering not only the topological configuration, but also the morphological features displaying design features at a circuitry stage of communicator design.

Keywords: communicator, internal electromagnetic interference, morphology of electronic devices.

Розглядаються методи моделювання високочастотних електричних кіл з використанням їх декомпозиції на комунікатор та компоненти. Класичні моделі, як правило, не враховують конструктивні особливості об'єкта проектування. Тому метою роботи стала розробка математичних моделей комунікаційних пристроїв в автономному та неавтономному режимах, що враховують внутрішню і зовнішню електромагнітну сумісність (ЕМС).

Автономний режим комунікатора передбачає відсутність сторонніх електромагнітних перешкод. В цьому режимі можна з'ясувати внутрішню ЕМС. За умови наявності сторонніх джерел електромагнітного поля модель комунікатора дозволяє визначити зовнішню ЕМС електронного пристрою, що характеризує його роботу у неавтономному режимі. Неавтономний режим роботи комунікатора електронного пристрою, як правило, виникає в мобільних системах (кораблі, супутники), де багато електроніки і які працюють у місці, щільно насиченому радіоприймальними пристроями.

В роботах інших авторів по даній темі головним чином висвітлювалась проблема зовнішньої ЕМС [1...3], в той час як нанотехнології вимагають коректного розв'язання задач внутрішньої ЕМС. Іншими словами, задачі конструкторсько-технологічного етапу проектування — розміщення, компоновка та трасування відіграють — суттєву роль в розв'язанні задач внутрішньої сумісності.

Спочатку було розглянуто моделі впливу сторонніх джерел. Дотепер передбачалося, що комунікатор розташований у просторі, який не містить сторонніх джерел електромагнітного поля. За таких умов зовнішні сумарні електричні і магнітні потоки векторів індукції, що проникають комунікатор, дорівнюють нулю. Проте така ситуація не завжди відповідає дійсності. Наприклад, при порушенні умов електромагнітної сумісності можуть виникнути потужні електромагнітні перешкоди: морські, повітряні та наземні лінії електропередач, антенні поля, нештатні ситуації на атомних електростанціях тощо, які призведуть до порушень або повної втрати роботоспроможності електроніки [1, 3]. Таким чином, комунікатор може вважатися автономним лише за умов нехтування зовнішнім електромагнітним впливом. В автономному стані згідно з першим законом Кірхгофа та теорією графів, можна вважати суму всіх наведених на дерева струмів такою, що дорівнює нулеві

$$\sum_{s=1}^{r+1} \dot{\mathbf{I}}_{HS} = 0, \quad (1)$$

де $r+1$ — загальна кількість дерев комунікатора;

$\dot{\mathbf{I}}_{HS}$ — наведений струм зсуву, безпосереднім джерелом якого є змінний у часі потік вектора електричної індукції з поверхні s -го дерева.

Оскільки дерева мають різні потенціали, то $\dot{\mathbf{I}}_{HS}$ — це сумарний струм з дерева s на решту дерев. Очевидно, що сума (1) є нульовою, бо струми зсуву з решти дерев на дерево s мають протилежний напрям, тобто обчислюються через ті ж складові потоки вектора індукції, що формуються початковим розподілом потенціалів, але в напрямі від решти дерев на дерево s .

У протилежному випадку, при наявності електромагнітного впливу на даний комунікатор з боку зовнішніх полів, наприклад, у багат шаровій друкованій платі, неавтономний режим (1) характеризується рівністю

$$\sum_{s=1}^{r+1} (\dot{\mathbf{I}}_{HS}^0 - \dot{\mathbf{I}}_{CS}) = 0, \quad (2)$$

де $\dot{\mathbf{I}}_{HS}^0$ — струм, що наводиться власним полем комунікатора;

$\dot{\mathbf{I}}_{CS}$ — сторонній струм, що наводиться зовнішнім полем.

Аналогічно, при нехтуванні (незначному впливі) на комунікатор магнітних зовнішніх полів, для контурів виконується рівність

$$\sum_{\alpha=1}^{q+1} \dot{U}_{H\alpha} = 0, \quad (3)$$

де $\dot{U}_{H\alpha}$ — наведена напруга в α -му контурі, джерелом якої є струми гілок дерев комунікатора;

q — кількість незалежних контурів, що утворюються шляхами гілки дерев та дуги комунікатора.

Подібно до (1) нульове значення (3) пояснюється тим, що контур має як внутрішній, так і зовнішній потік вектора магнітної індукції, що течуть в протилежні від обраного в просторі додатного напрямку, сторони, тобто мають різні знаки. Отже (3) можна трактувати, як компенсацію внутрішніх потоків незалежних контурів зовнішнім потоком найбільшого за площею $(p+1)$ -го залежного від них контура. Слід підкреслити, що кількість незалежних контурів q пов'язана з кількістю компонентів k , кількістю дерев $r+1$ та загальною кількістю полюсів n рівністю

$$n = p + r + k.$$

Якщо ж сторонніми напругами $U_{C\alpha}$, що індуктуються зовнішніми магнітними потоками, нехтувати не можна, то натомість (3) використовуємо рівність

$$\sum_{\alpha=1}^q \dot{U}_{H\alpha}^0 - U_{C\alpha} = 0, \quad (4)$$

де $\dot{U}_{H\alpha}^0$ — напруга від власного поля комунікатора, що наводиться в контурі α ;

$\dot{U}_{C\alpha}$ — стороння напруга, що наводиться зовнішнім полем.

Далі необхідно перейти до запису матричних рівнянь комунікатора всього кола. Конкретний комунікатор характеризується єдиним набором дерев, оскільки вони конструктивно задані, то відомо і список тих полюсів компонентів, які потрібно з'єднати проводами. Такий список можна представити розширеною матрицею дерев $[\mathbf{D}']$ комунікатора, у якій номери стовпців відповідають номерам полюсів, а номери рядків відповідають номерам дерев. Приналежність полюса конкретному дереву позначається елементом матриці "1", у протилежному випадку ставиться "0". Хай дерево з найбільшою кількістю полюсів відповідає останньому рядку матриці $[\mathbf{D}']_{r+1,r+1}$. Якщо цей рядок вилучити, то можна отримати відповідну матрицю незалежних дерев, яка позначиться через $[\mathbf{D}]_{r,r}$.

Аналогічно вводиться інформація про топологічну структуру контурів комунікатора. У виборі сукупності незалежних контурів існує певна неоднозначність. Нехай відомі набори дуг компонентів, що входять до складу контура. Складається розширена матриця контурів $[\mathbf{K}']$, де номери стовпців відповідають номерам дуг, а номери рядків — номерам контурів. Приналежність дуги компонента контуру позначається елементом матриці — один. Останній рядок матриці $[\mathbf{K}']$ відповідає найбільшому за розмірами контуру, що важливий при оцінці ступеня впливу на даний комунікатор зовнішніх електромагнітних полів. При видаленні останнього рядка з $[\mathbf{K}']$ одержується матриця незалежних контурів $[\mathbf{K}]$ [4].

З використанням матриць $[\mathbf{D}]$ і $[\mathbf{K}]$ сукупність незалежних наведених струмів та напруг комунікатора охоплюється матричними рівняннями

$$[\mathbf{D}][\dot{\mathbf{I}}] = [\dot{\mathbf{I}}_H], \quad [\mathbf{K}][\dot{\mathbf{U}}] = [\dot{\mathbf{U}}_H], \quad (5)$$

де $[\dot{\mathbf{I}}]$ — матриця струмів;

$[\dot{\mathbf{U}}]$ — матриця напруг;

$[\dot{\mathbf{I}}_H]$ — матриця наведених струмів;

$[\dot{\mathbf{U}}_H]$ — матриця наведених напруг.

Матриці $[\dot{\mathbf{I}}_H]$ та $[\dot{\mathbf{U}}_H]$ можна представити як

$$[\dot{\mathbf{I}}_H] = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{H_1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{H_2} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{I}}_{H_r} \end{bmatrix}, \quad [\dot{\mathbf{U}}_H] = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{H_1} \\ \dot{\mathbf{U}}_{H_2} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{U}}_{H_q} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а матриці струмів полюсів та напруг дуг компонентів $[\dot{\mathbf{I}}]$ та $[\dot{\mathbf{U}}]$ — як

$$[\dot{\mathbf{I}}] = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_1 \\ \dot{\mathbf{I}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{I}}_n \end{bmatrix}, \quad [\dot{\mathbf{U}}] = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_1 \\ \dot{\mathbf{U}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{U}}_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Наведені струми та напруги (6) можна представити в аналітичній формі через дескриптори математичної моделі (7) шляхом введення, як в теорії довгих ліній, "первинних" R, L, C, G параметрів комунікатора як матриць пропорційності між матрицями (6) та (7).

Об'єднуючи поняття струмових (опірних $[\mathbf{R}^d]_{q,n}$ і індуктивних $[\mathbf{Z}^d]_{q,n}$) та напругових (провідних $[\mathbf{G}^d]_{r,n}$ і ємнісних $[\mathbf{Y}^d]_{r,n}$) параметрів, можна отримати узагальнені комплексні параметри комунікатора

$$[\mathbf{Z}_i]_{q,n} = [\mathbf{R}^d]_{q,n} + [\mathbf{Z}^d]_{q,n},$$

$$[\mathbf{Y}_u]_{r,n} = [\mathbf{G}^d]_{r,n} + [\mathbf{Y}^d]_{r,n},$$

де $[\mathbf{Z}^d]_{q,n} = j\omega[\mathbf{L}^d]_{q,n} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \cdots & \mathbf{L}_{1k} & \cdots & \mathbf{L}_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{L}_{s1} & \cdots & \mathbf{L}_{sk} & \cdots & \mathbf{L}_{sn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{L}_{q1} & \cdots & \mathbf{L}_{qk} & \cdots & \mathbf{L}_{qn} \end{bmatrix};$ (8)

$$[\mathbf{Y}^d]_{r,n} = j\omega[\mathbf{C}^d]_{r,n} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \cdots & \mathbf{C}_{1k} & \cdots & \mathbf{C}_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{C}_{s1} & \cdots & \mathbf{C}_{sk} & \cdots & \mathbf{C}_{sn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{C}_{r1} & \cdots & \mathbf{C}_{rk} & \cdots & \mathbf{C}_{rn} \end{bmatrix};$$
 (9)

$$j = \sqrt{-1};$$

ω — циклічна частота.

Формули (8) та (9) встановлюють взаємозв'язок між реакцією, тобто наведеними величинами, і впливом — опосередкованими джерелами наведених струмів та напруг

$$[\dot{\mathbf{I}}_H]_{r,1} = [\mathbf{Y}_u]_{r,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1}, \quad [\dot{\mathbf{U}}_H]_{n,1} = [\mathbf{Z}_i]_{q,n}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1},$$
 (10)

де $[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1}$ — матриця опосередкованих джерел наведених струмів із загальною кількістю полюсів від n до 1;

$[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1}$ — матриця опосередкованих джерел наведених напруг із загальною кількістю полюсів від n до 1.

Елементи матриць (6) представляються лінійними комбінаціями (10).

Тепер отримуємо матричні рівняння комунікатора в автономному режимі

$$[\mathbf{D}]_{r,1}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1} = [\mathbf{Y}_u]_{r,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1}, \quad [\mathbf{K}]_{q,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1} = [\mathbf{Z}_i]_{q,n}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1},$$
 (11)

де $[\mathbf{K}]_{q,n}$ — матриця незалежних контурів кількістю q та із загальною кількістю полюсів n .

Отже, комунікатор характеризується рівняннями, що містять лише шукані величини компонентів — струми полюсів \mathbf{I}_k і напруги U_k дуг.

Неавтономний режим комунікатора може характеризуватись рівнянням, що має вигляд

$$[\mathbf{D}]_{r,1}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1} = [\mathbf{Y}_u]_{r,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1} + [\dot{\mathbf{I}}_c]_{r,1}. \quad (12)$$

де $[\dot{\mathbf{I}}_c]_{r,1}$ — струми, що викликані впливом стороннього електромагнітного поля;

$[\dot{\mathbf{U}}_c]_{q,1}$ — напруги, що викликані впливом стороннього електромагнітного поля.

$$[\mathbf{K}]_{q,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1} = [\mathbf{Z}_i]_{q,n}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1} + [\dot{\mathbf{U}}_c]_{q,1}, \quad (13)$$

Отримані рівняння (12), (13) являють собою математичну модель комунікатора в найбільш узагальненому вигляді. З неї можуть бути отримані окремі випадки, наприклад, за відсутністю впливу власних полів комунікатора, зовнішні електромагнітні перешкоди через комунікатор описуються у вигляді

$$[\mathbf{D}]_{r,1}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1} = [\dot{\mathbf{I}}_c]_{r,1},$$

$$[\mathbf{K}]_{q,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1} = [\dot{\mathbf{U}}_c]_{q,1},$$

а якщо, до того ж відсутні і сторонні електромагнітні перешкоди, то

$$[\mathbf{D}]_{r,1}[\dot{\mathbf{I}}]_{n,1} = [\mathbf{0}]_{r,1}, \quad (14)$$

$$[\mathbf{K}]_{q,n}[\dot{\mathbf{U}}]_{n,1} = [\mathbf{0}]_{q,1}, \quad (15)$$

що характеризує нульовий статус комунікатора.

Тепер розглянемо електродинамічні оцінки автономності комунікатора.

Оцінити правомірність застосування тієї чи іншої моделі аналізу можна на основі завдання мінімальних значень її допустимих дескрипторів, якими можна знехтувати, наприклад, напруг $U_{\text{нех}}$ та струмів $\mathbf{I}_{\text{нех}}$. Ці величини не можуть перевищувати прирости напруг та струмів, що формуються технологічними допусками на відхилення від номіналів компонентів електронного пристрою. Окрім того, є і природні обмеження: $U_{\text{нех}}$ та $\mathbf{I}_{\text{нех}}$ не можуть перевищувати теплової напруги U_T , або відповідно теплового струму \mathbf{I}_T Найквіста, що виникають в резисторі [3],

$$U_T = \sqrt{4kT\Delta f R}, \quad \mathbf{I}_T = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}}, \quad (16)$$

де k — постійна Больцмана, ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T — абсолютна температура, К;

Δf — смуга еквівалентного частотного спектру, Гц;

R — омичний опір резистора, Ом.

Для приведених до одиничних значень смуги та опору величини (16) при кімнатній температурі в 280 К (17 °С)

$$U_T = 1,26 \cdot 10^{-10}, \quad \mathbf{I}_T = 1,26 \cdot 10^{-10}.$$

Таким чином, наведеними в контурах напругами та наведеними з дерев комунікатора струмами можна нехтувати за умови

$$U_{\text{нех}} \leq U_T = 1,26 \cdot 10^{-10}, \quad \mathbf{I}_{\text{нех}} \leq \mathbf{I}_T = 1,26 \cdot 10^{-10}. \quad (17)$$

Зауважимо, що числові значення за (17) не є єдино можливими. В залежності від типу дескрипторів, виду моделі та інших чинників величини $U_{\text{нех}}$ та $\mathbf{I}_{\text{нех}}$ можуть приймати різні значення. Питання їх вибору слід віднести не до математичної, а до фізичної моделі нановиробу.

То ж для правомірності користування рівняннями електромагнітної автономії комунікатора (14) необхідно, щоб для кожного дерева сторонній струм \mathbf{I}_{Cs} та для кожного контура комунікатора стороння напруга U_{Cq} не перевищували мінімально допустимих рівнів

$$U_{Cs} < U_{\text{нех}}, \quad \mathbf{I}_{Cs} < \mathbf{I}_{\text{нех}}, \quad (18)$$

де $U_{\text{нех}}$ — можна обрати найменшу напругу серед дуг усіх компонентів, що входять у контур;

$\mathbf{I}_{\text{нех}}$ — найменший струм серед полюсів компонентів.

Для перевірки (18) необхідно знайти або апіорі задати рівень інтенсивності зовнішнього електромагнітного поля у вигляді сторонніх напруг і струмів (2), (4). Якщо вважати, що найбільш розгалужену поверхню має $(r+1)$ -е дерево, а найбільша площа охоплюється $(q+1)$ -м контуром, тобто припустити, що найбільшими сторонніми струмом і напругою є $\mathbf{I}_{c,r+1}$, $U_{c,q+1}$, то з (12), (13) можна одержати умови електромагнітної автономії комунікатора

$$|\dot{\mathbf{I}}_{c,r+1}| < \xi \left| \sum_{k=1}^n (D_{r+1,k} \dot{\mathbf{I}}_k - Y_{r+1,k}^d \dot{U}_k) \right|, \quad (19)$$

$$|\dot{U}_{c,q+1}| < \xi \left| \sum_{k=1}^n (K_{q+1,k} \dot{U}_k - Z_{q+1,k}^d \dot{\mathbf{i}}_k) \right|, \quad (20)$$

де $0 < \xi < 1$ — коефіцієнт нехтування стороннім електромагнітним впливом.

Параметри $Y_{r+1,k}^d$ та $Z_{p+1,k}^d$ “зовнішнього” дерева та контура, знаходяться за параметрами “визначених” [5] матриць (8), (9) $[Z^d]_{q,n}$, $[Y^d]_{r,n}$ відповідно до формул

$$Y_{r+1,k}^d = -\sum_{s=1}^r Y_{sk}^d, \quad (21)$$

$$Z_{q+1,k}^d = -\sum_{s=1}^q Z_{sk}^d, \quad (22)$$

де Y_{sk}^d — параметри визначеної смісної матриці (9) через потік вектора електричної індукції з поверхні s -го дерева і загальною кількістю компонентів k ;

Z_{sk}^d — параметри визначеної матриці потоку вектора електричної індукції (8) з поверхні s -го дерева і загальною кількістю компонентів k .

Мається на увазі, що (21) і (22) являють собою останній рядок добудованих з (8) і (9) “невизначених” [5] матриць

$$[Z^d]_{q+1,n} = j\omega [L^d]_{q+1,n} = j\omega \begin{bmatrix} L_{11} & \dots & L_{1k} & \dots & L_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{s1} & \dots & L_{sk} & \dots & L_{sn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{q+1,1} & \dots & L_{q+1,k} & \dots & L_{q+1,n} \end{bmatrix},$$

$$[Y^d]_{r+1,n} = j\omega [C^d]_{r+1,n} = j\omega \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1k} & \dots & C_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{s1} & \dots & C_{sk} & \dots & C_{sn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{r+1,1} & \dots & C_{r+1,k} & \dots & C_{r+1,n} \end{bmatrix}.$$

Оцінка неавтономності в такий спосіб дозволяє суттєво скоротити обсяг обчислювальних операцій у порівнянні з алгоритмом поконтурної (13) та подеревної (12) оцінок окремо.

Для визначення умови нехтування впливом комунікатора в квазістационарному режимі треба розглянути рівняння комунікатора (11), які перетворюються в рівняння Кірхгофа (14) та (25) за умови можливості нехтування правих частин (11)

$$[D]_{r,1} [\dot{\mathbf{i}}]_{n,1} \gg [Y_u]_{r,n} [\dot{U}]_{n,1}, \quad [K]_{q,n} [\dot{U}]_{n,1} \gg [Z_i]_{q,n} [\dot{\mathbf{i}}]_{n,1}. \quad (23)$$

В оціночні нерівності (23) входять струми полюсів та напруги дуг компонентів, які відносяться до області визначення напруг та струмів. Підсилюючи нерівності (23) шляхом заміни дескрипторів на їх мінімаксні значення знаходяться більш надійні оцінки нехтування електромагнітним впливом комунікатора

$$[D]_{r,1} \left[|\dot{\mathbf{i}}|_{\min,n,1} \right] \gg [Y_u]_{r,n} \left[|\dot{U}|_{\max} \right]_{n,1}, \quad [K]_{q,n} \left[|\dot{U}|_{\min} \right]_{n,1} \gg [Z_i]_{q,n} \left[|\dot{\mathbf{i}}|_{\max} \right]_{n,1},$$

де $\mathbf{I}_{\max} = \max \{ |\dot{\mathbf{i}}_1|, \dots, |\dot{\mathbf{i}}_n| \}$, $\mathbf{I}_{\min} = \min \{ |\dot{\mathbf{i}}_1|, \dots, |\dot{\mathbf{i}}_n| \}$,

$U_{\max} = \max \{ |\dot{U}_1|, \dots, |\dot{U}_n| \}$, $U_{\min} = \min \{ |\dot{U}_1|, \dots, |\dot{U}_n| \}$.

Зважаючи на введений в (19) і (20) коефіцієнт нехтування $0 < \xi < 1$, що визначає допустимий рівень перешкод

$$I_{\text{нех}} = \xi I_{\text{min}}, \quad U_{\text{нех}} = \xi U_{\text{min}},$$

можна записати ще жорсткішу вимогу на виконання умови нехтування електромагнітним впливом комунікатора в квазістаціонарному режимі

$$[D]_{r,1} [I_{\text{нех}}]_{n,1} \gg [Y_u]_{r,n} [|\dot{U}|_{\text{max}}]_{n,1}, \quad [K]_{q,n} [U_{\text{нех}}]_{n,1} \gg [Z_i]_{q,n} [|\dot{i}|_{\text{max}}]_{n,1}.$$

Таким чином, розглянуті нерівності дозволяють проводити схемотехнічне проектування комунікаторів у нерозривному зв'язку з конструкторсько-технологічним проектуванням і враховувати їх морфологічні особливості при проектуванні електронних пристроїв.

Література

1. 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.
2. Волин, М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М.Л. Волин. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1981. — 296 с.
3. Варламов, Р.Г. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Р.Г. Варламов. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.
4. Князь, А.И. Электродинамическое обоснование схемотехнического проектирования РЭА / А.И. Князь. — Одесса: ОЭИС им. А.С. Попова, 1980. — 55с.
5. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. — 4-е изд. — М.: Наука, 1988. — 552 с.

References

1. Knyazev, A.D. Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno-vychislitel'noy apparatury s uchetom EMS [Design of radioelectronic and computing equipment with regard for EMS] / A.D. Knyazev, L.N. Kechiev, B.V. Petrov. — Moscow, 1989. — 224 pp.
2. Volin, M.L. Parazitnye protsessy v radioelektronnoy apparature [Parasitic processes in radioelectronic equipment] / M.L. Volin. — Moscow, 1981. — 296 pp.
3. Varlamov, R.G. Spravochnik konstruktora REA: Obshchie printsipy konstruirovaniya [Directory of the designer of REE: General principles of designing] / R.G. Varlamov. — Moscow, 1980. — 480 pp.
4. Knyaz', A.I. Elektrodinamicheskoe obosnovaniye skhemotekhnicheskogo proektirovaniya REA [Electrodynamic justification of schematic design of REE] / A.I. Knyaz'. — Odessa, 1980. — 55 pp.
5. Gantmakher, F.R. Teoriya matrits [Theory of matrices] / F.R. Gantmaher. — Moscow, 1988. — 552 pp.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. держ. акад. харч. технологій Плотников В.М.

Надійшла до редакції 18 травня 2012 р.