

УДК: 537.8, 620.3, 621.3, 681.2, 62-93

РЕАКТИВНІ КОМПОНЕНТИ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

Кудря В. Г.

*Одеський національний політехнічний університет,
Інститут комп'ютерних систем,
65044, Україна, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.
st1537@stalker.in.ua*

РЕАКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Кудря В. Г.

*Одесский национальный политехнический университет,
Институт компьютерных систем,
65044, Украина, г. Одесса, пр. Шевченка, 1.
st1537@stalker.in.ua*

REACTIVE COMPONENTS OF THE SECOND ORDER

Kudrya V. G.

*Odessa National Polytechnic University,
Institute of Computer Systems,
65044, Ukraine, t. Odessa. pr. Shevchenka 1.
st1537@stalker.in.ua*

Анотація. Запропоновано метод розробки реактивних компонентів, зокрема, конденсаторів, обмоток трансформаторів та котушок індуктивностей. На відміну від існуючих принцип дії зазначених компонентів ґрунтується на застосуванні, по-перше, проміжних перетворень потоків векторів електричної (магнітної) індукції в потік вектора магнітної (електричної) індукції. По-друге, в запропонованих розробках використовується струм зсуву, як рівнозначне до струму провідності джерело магнітного потоку. Метод дозволяє розширити функціональність, зменшити вартість, покращити технічні характеристики пасивних реактивних компонентів електричних кіл у високочастотній області їх застосування.

Ключові слова: котушка індуктивності, конденсатор, трансформатор.

Аннотация. Предложен метод разработки реактивных компонентов, в частности, конденсаторов, обмоток трансформаторов и катушек индуктивности. В отличие от существующих принцип действия указанных компонентов основывается на применении, во-первых, промежуточных преобразований потоков векторов электрической (магнитной) индукции в поток вектора магнитной (электрической) индукции. Во-вторых, в предложенных разработках используется ток смещения, как равнозначный к току проводимости источник магнитного потока. Метод позволяет расширить функциональность, уменьшить стоимость, улучшить технические характеристики пассивных реактивных компонентов электрических цепей в высокочастотной области их применения.

Ключевые слова: катушка индуктивности, конденсатор, трансформатор.

Abstract. The method of developments reactive components, including capacitors, windings of transformers and inductors. Unlike the existing principle of these components based on the application, first, intermediate streams transformations of the electric (magnetic) induction in magnetic flux (electric) induction. Secondly, the proposed designs used in the bias current as a current equivalent to the current conduction - the source of magnetic flux. The method allows to extend the functionality, reduce cost, improve the performance of passive reactive components of electrical circuits in high-frequency fields of application.

Key words: inductor, capacitor, transformer.

Запропоноване в даній роботі дослідження взаємоперетворень потоків індукції реактивних компонентів відноситься до галузі електронного виробництва. Темою роботи є розкриття властивостей, що з точки зору аксіоматики теорії електричних кіл (ЕК) не є властивими для класичного розуміння та визначення параметрів ідеалізованих реактивних компонентів: котушок індуктивностей, конденсаторів, трансформаторів тощо.

Актуальність розробки продиктована використанням реактивних компонентів у високочастотній та надвисокочастотній області, що характеризуються проявом різноманітних польових ефектів, що відносяться до класу «паразитних» явищ. Відсутність поглибленої електродинамічної трактовки певних понять реактивних компонентів, не дозволяють застосовувати їх в багатьох практичних цілях, зокрема, при створенні чутливих елементів електромагнітних полів, оцінки електромагнітної сумісності тощо. Актуальність роботи також продиктована необхідністю виконання експериментальних робіт з дослідження внутрішніх і зовнішніх електромагнітних завод монолітних інтегральних схем та удосконаленню процесу технології їх проектування [1, 2, 3] шляхом розробки масштабних схем та конструкцій зі збереженням співвідношення довжини електромагнітної хвилі та характерного розміру об'єкта проектування. **Метою даної статті** є застосування системного підходу до методів конструювання реактивних компонентів.

Реактивні трансфілдери. Розробка реактивних компонентів, як перетворювачів потоків векторів індукції електромагнітного поля, ґрунтується на перетворенні струму провідності вільних зарядів у металевих провідниках в потоки вектора магнітної індукції в осердях індуктивних елементів та (або) в потоки вектора електричної індукції між металевими обкладинками конденсаторів.

В існуючих видах реактивних компонентів трансформація електричної енергії струму провідності (активної енергії) в реактивну енергію потоків векторів індукції здійснюється шляхом конструктивної деформації провідників вільних зарядів. Наприклад, трансформація будь-якої точки провідника в паралельні провідникові пластини породжує між ними просторове електричне поле, а трансформація лінійного провідника в обвитки котушки породжує просторове магнітне поле. Володіючи певними інерційними у часі властивостями просторові поля забезпечують безперервність у часі струмів індуктивностей та напруг емоностей, що формулюються в теорії електричних кіл як «закопи комутації».

В ємнісному елементі, при прикладенні до нього змінної напруги, відбувається накопичення зарядів на пластинах конденсатора, які, як джерело електричного поля, викликають зміну потоку вектора електричної індукції у часі, що еквівалентно густині струму зсуву. Такий струм існує між пластинами у вигляді змінного електричного поля.

Для створення магнітного потоку провід намотують у вигляді котушки, всередину якої для підсилення магнітного потоку вставляють осердя з достатньо великою магнітною проникністю, в ідеалі $\mu \rightarrow \infty$. Для створення потоку вектора електричної індукції, кінці розтину лінійного провідника виготовляють у вигляді металевих пластин, між якими розташовують ізоляційні матеріали – діелектрики з достатньо високими значеннями діелектричної проникності, в ідеалі $\varepsilon \rightarrow \infty$. Спосіб реалізації розглянутих видів реактивних компонентів ґрунтується на взаємному перетворенні інтегральних потоків векторів магнітного та електричного полів, внаслідок чого такі пристрої дістали назву [4] трансфілдерів потоків векторів індукції електромагнітного поля. Основу обґрунтування способів їх реалізації складає теоретична та прикладна електродинаміка і теорія електричних кіл.

Перш за все, виокремимо трансфілдер, як компонент, що здатний накопичувати та віддавати реактивну енергію. До множини компонентів такого роду належать реактивні багатополіусники. Найпростішим реактивними компонентами є ідеалізовані двополіусні трансфілдери, зокрема котушки індуктивності та конденсатори, що характеризуються своїми параметрами, зокрема, індуктивністю L та відповідно ємністю C .

У рамках електродинамічної моделі індуктивність L являє собою коефіцієнт пропорційності між потоком $\Phi(t)$ вектора магнітної індукції та джерелом цього магнітного

потоків – струмом $i(t)$ котушки індуктивності. Аналогічно, ємність C – коефіцієнт пропорційності між потоком $N(t)$ вектора електричної індукції між пластинами конденсатора та джерелом цього потоку – напругою $u(t)$, що прикладена до цих пластин

$$\Phi(t) = Li(t); \quad N(t) = Cu(t). \quad (1)$$

Потоки (1) через осердя котушки та між пластинами обчислюються відповідно до морфологічних властивостей котушки та конденсатора як

$$\hat{O}(t) = \int_{S_k} \bar{B} d\bar{s} \quad N(t) = \int_{S_p} \bar{D} d\bar{s}, \quad (2)$$

де \bar{B}, \bar{D} – вектори магнітної та електричної індукцій, відповідно в площині осердя котушки S_k та однієї з пластин конденсатора S_p .

З іншого боку, в моделях теорії електричних кіл взаємозв'язок між струмом $i(t)$ та напругою $u(t)$ на ідеалізованих реактивних компонентах індуктивності та ємності [5], [7] записують у вигляді інтегральних та диференціальних співвідношень:

$$u = L * \frac{di}{dt}; \quad i = \frac{1}{L} * \int_{-\infty}^t u dt = i(0) + \frac{1}{L} * \int_0^t u dt, \quad (3)$$

для індуктивності та ємності

$$i = C \frac{du}{dt}; \quad u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt. \quad (4)$$

Взаємозв'язок між моделями (1), (2) та (3), (4) визначається на основі співвідношень електродинаміки [6, 9]

$$\hat{O}(t) = \int_{S_k} \bar{B} d\bar{s}; \quad N(t) = \int_{S_p} \bar{D} d\bar{s}. \quad (5)$$

Фізичні процеси багатополюсних трансфілдерів (трансформаторів та інших реактивних багатополюсників) відрізняються лише тим, що потоки векторів індукції (2) відгалужуються їх концентраторами (в ідеалі з $\varepsilon \rightarrow \infty$ та $\mu \rightarrow \infty$), направляються в інші котушки та місця накопичувачів заряду для перетворення останніх відповідно в напругу та струм (5).

За допомогою всього двох типів реактивних ідеалізованих компонентів, згідно з [6], можна моделювати частотні характеристики різноманітних багатополюсників ЕК. При цьому для розробки складної форми характеристики потрібна значна кількість таких компонентів, що безумовно не завжди доцільно. Виникає питання, а чи не можна за базовий компонент взяти такий, що використовує одночасно як магнітні, так і електричні властивості електромагнітного поля. Іншими словами, а чи неможливо побудувати компонент як аналог ЕК другого порядку, тобто комбінаційні властивості ємнісного та індуктивного компонентів поєднати в одному конструктивно закінченому елементі? Нагадаємо, що порядок дорівнює кількості реактивних компонентів, які незалежно накопичують енергію. Його величина збігається з порядком диференціального рівняння, що складається відносно будь-якого дескриптора ЕК. Принципово такі компоненти існують у вигляді розподілених відрізків довгих ліній, резонаторів, але їх властивості змінюються зі зміною розмірів лінії та довжини хвилі, що випромінюється струмом та зарядами (напругою). У даному випадку формулювання задачі носить більш узагальнюючий характер: розробити конструкцію реактивного компонента, що володів би властивостями різнохарактерних реактивних опорів у широкому діапазоні частот, або взагалі їх реактивні параметри не залежали б від частоти.

Принципи побудови трансфілдерів. Переконаємось у можливості розробки компонентів другого порядку.

Як зазначалось в [4] фізичні процеси, що відбуваються в трансфілдерах можна описати у вигляді послідовності перетворень, рис. 1, де можливі варіанти трансформації потоків індукції залежать від порядку n трансфілдера T_{xy}^n .

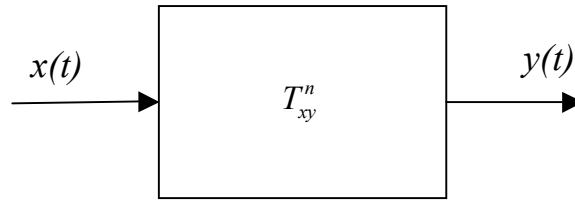


Рисунок 1 – Перетворення фізичних величин

Порядок трансфілдера n , як і порядок будь-якого електричного кола, визначається кількістю різнотипних потоків (Φ або N) індукції, що перетворюються один в одного в процесі формування реакції $y(t)$ на вплив $x(t)$, табл. 1.

Таблиця 1 – Порядок трансфілдера

Подразник $x(t)$	Реакція $y(t)$	
	$u(t)$	$i(t)$
$i(t)$	$\Phi(t); n=1$	$\Phi(t) \rightarrow N(t); n=2$
$u(t)$	$N(t) \rightarrow \Phi(t) n=2$	$N(t); n=1$

Слід мати на увазі, що в табл. 1 наведені перетворення трансфілдерами, що мають порядок $n \leq 2$. При $n = 3$ можливі наступні ланцюжки перетворень $\hat{O} \rightarrow N \rightarrow \hat{O}^1$ або $N \rightarrow \hat{O} \rightarrow N^1$. Зрозуміло, що в такий спосіб можна конструювати трансфілдери і більш високого порядку.

Вхідні та вихідні величини (напруги u та струми i), у свою чергу, також визначаються операціями [5, 6] (потік, циркуляція) над векторами

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}; \quad \bar{J} = \sigma \bar{E}; \quad \bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (6)$$

де \bar{E}, \bar{H} – вектори напруженості електромагнітного поля у середовищі з речовинними (матеріальними) параметрами: μ – абсолютна магнітна проникність; ϵ – абсолютна діелектрична проникність; σ – питома електропровідність опору. Матеріальні рівняння (6) в навантаженні та генераторі не мають відношення до внутрішніх процесів, перетворень потоків за схемою, рис. 1, і тому в подальшому не деталізуються.

Фізичні процеси перетворення потоків трансфілдерами, рис. 1, визначаються рівняннями Максвелла

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}; \quad \text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (7)$$

тобто змінне у часі магнітне поле породжує електричне і навпаки.

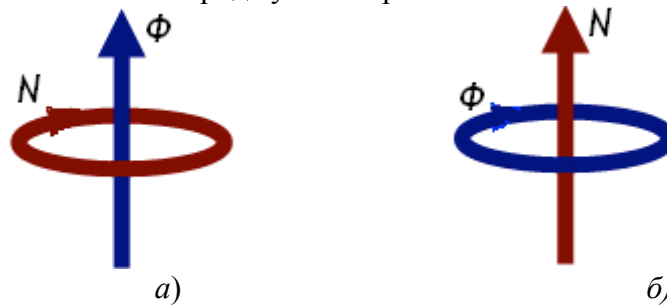


Рисунок 2 – Орієнтація електричного N та магнітного Φ потоків:
а) початковим є магнітний потік; б) початковим є електричний потік

Взаємозв'язок та взаємна орієнтація інтегральних потоків Φ та N , рис. 2, через поверхні ненульової площі з векторами напруженості електромагнітного поля в окремих точках можна визначити задавшись конкретною конструкцією трансфілдера. Наприклад, розглянемо рівномірно розподілене магнітне поле всередині котушки індуктивності діаметра \emptyset , рис. 3. Нехай вектори магнітної індукції в точках «а» та «b» спрямовані в площину рисунка. У площині, ортогональній до вісі симетрії котушки, формуються вихорні електричні поля, відповідно D_a та D_b . Силкові лінії електричного поля матимуть вигляд концентричних кіл, центрами яких є точки «а» та «b». Дотичні до них вектори електричного поля взаємокомпенсуються між точками «а» та «b», рис. 3, а і складаються поза межами відрізка [a, b], рис. 3, б.

Таким чином, поступове витискання за межі осердя котушки електричного потоку N , рис. 3, в, спричиняє його зростання біля її бічної поверхні, що використовується при конструюванні існуючих видів трансфілдерів типу – індуктивних трансформаторів з концентраторами магнітного потоку. Аналогічні міркування, покладені в основу розробки ємнісного трансформатора [8].

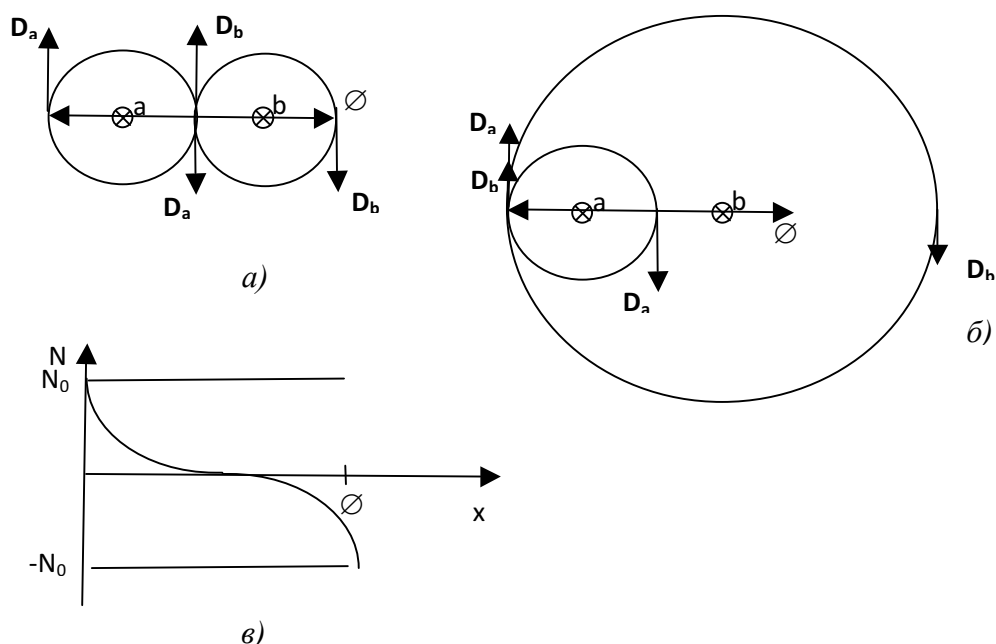


Рисунок 3 – Витискання електричного поля на периферію котушки індуктивності:

- а) зменшення електричного потоку всередині котушки;
- б) збільшення електричного потоку на периферії обмотки котушки;
- в) розподіл потоку вектора електричної індукції за діаметром \emptyset котушки

Конструктивна реалізація трансфілдерів. Керуючись викладеними вище принципами пропонуються різноманітні шляхи розробки нових трансфілдерів за двома напрямками: заміна металевих дротів котушок, обмоток, пластин конденсаторів та концентраторів потоків векторів індукції на напівпровідникові, діелектричні та магнітопровідні; використання струму зсуву, у відповідності з (7), як джерела магнітного потоку.

За структурною схемою трансфілдерів, рис. 1, та значеннями індексів оператора $T_{x,y}^n$, табл. 1, можливі наступні конструктивні варіанти:

– виготовлення діелектричної котушки індуктивності з сегнетоелектрика, магнітний потік якої створюється обвитком, або обвитками діелектричного дроту, що не торкаються один одного, або мають велику діелектричну проникність, величина якої на декілька

порядків перевищує діелектричну проникність ізоляційної оболонки сегнетоелектричного дроту;

- створення обмоток трансформаторів з різними діелектричними, провідними (напівпровідними) та магнітними властивостями;
- застосування стрічкових конденсаторів, що володіють властивостями індуктивних імпедансів;
- розробка трансформаторів з ємнісним входом та (або виходом).

Для кожного з запропонованих варіантів реактивних компонентів нескладно навести структурні схеми їх реалізації, окремі елементи яких зазначені в наступних прикладах.

Приклад 1. Розглянемо фізичні процеси, що мають місце в ідеалізованій котушці індуктивності, що характеризується оператором $T_{i,u}^1$. Механізм виникнення напруги достатньо простий. Згідно з рис. 1 та табл. 1, вона виникає внаслідок послідовних перетворень: струм зовнішнього джерела $i(t)$, що тече через обвитки котушки, створює магнітний потік $\Phi(t)$, а останній, пронизуючи осердя котушки, викликає в ній напругу $u(t)$ у відповідності з (1), (2), (3). У зазначеній послідовності перетворень інша складова електромагнітного поля – потік вектора електричної індукції N , у функціональних перетвореннях $T_{i,u}^1$ невідображена, але проявляється у вигляді потоку вектора електричної індукції в обвитках останньої в результаті підключення генератора струму до котушки. Саме зміну (похідну) цього потоку називають сторонньою електрорушійною силою, що виникає в котушці внаслідок явища самоіндукції, або взаємоіндукції. За наявності навантаження (замкнутого електропровідного шляху з опором, що підключений паралельно індуктивності) струм перерозподіляється між паралельними гілками і напруга на навантаженні змінюється.

У розглянутому випадку котушка виконує подвійне функціональне навантаження: вхідне ЕК, струм якого породжує магнітний потік; вихідне ЕК, що оперує з іншою складовою електромагнітного поля, а саме з потоком вектора електричної індукції. Цей потік зосереджено в об'ємі провідника, з якого намотана котушка, призводить до переміщення зарядів у лінійному електричному полі цього провідника. Разом з тим, потік вектора магнітної індукції може бути створено не лише рухомими носіями зарядів, а і струмом зсуву (змінною потоку вектора у сегнетоелектриці, що може бути виготовлений у вигляді тонкого волокна, з якого можна намотати котушку індуктивності). Така котушка індуктивності може мати великий вхідний опір на нижніх частотах (ємнісний), а на високих частотах – індуктивний реактивний опір. В котушці індуктивності, що намотана дротом з сегнетоелектрика, відбувається практично безінерційна поляризація зв'язаних молекул (електричних диполів) під дією напруги u , що прикладена до котушки. Орієнтація в кожній точці дроту цих диполів повторює орієнтацію траєкторії дроту. Такими властивостями володіють сегнетоелектрики з відносною діелектричною проникністю ϵ_s , що на декілька порядків перевищують відносну діелектричну провідність повітря та звичайних діелектриків з $\epsilon_d \ll \epsilon_s$. У таких провідниках струмом провідності по відношенню до струму зсуву можна нехтувати в широкому діапазоні частот.

Принцип дії котушки пояснюється на рис. 4, де 1 – котушка, з віссю 2 симетрії OO' , що намотана сегнетоелектричним дротом 1. Прикладання до кінців котушки зовнішнього джерела електроенергії викликає поляризацію доменів, що набувають властивостей електричних диполів. Ці диполі, залишаючись на місці в кристалічній решітці, змінюють лише свою орієнтацію і вибудовуються для певного моменту часу паралельно не вісі OO' , рис. 4, а вісі симетрії діелектричного дроту 1. Враховуючи змінний у часі характер зовнішнього джерела електроенергії у середині дроту 1, матимемо пульсуюче електричне поле, що породжує у відповідності з (7) густину струму зсуву, величина якого тим більше, чим більше частота зовнішнього джерела. З точки зору зовнішнього прояву струм провідності та струм зсуву рівнозначні [9] – орієнтація магнітного поля котушки з металевим

дротом подібна до орієнтації магнітного поля котушки з сегнетоелектричним дротом. Таким чином, струм зсуву також породжує всередині котушки магнітний потік Φ , рис. 4.

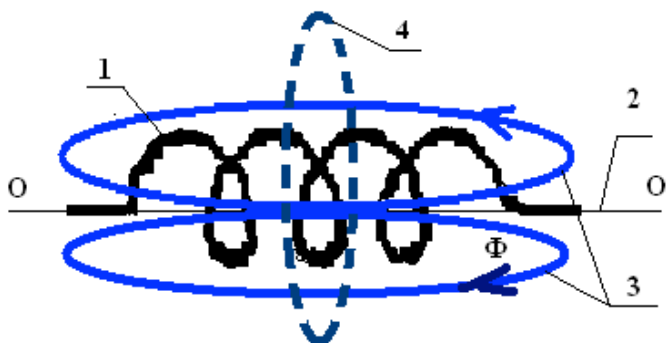


Рисунок 4 – Котушка індуктивності: 1 – сегнетоелектричний дріт; 2 – вісь симетрії OO' котушки; 3 – траєкторія потоку Φ вектора магнітної індукції; 4 – траєкторія потоку Φ вектора магнітної індукції для котушки з ідеалізованого діелектрика

Як зазначалось, такого виду переорієнтація диполів можлива лише в діелектриках, відносна діелектрична проникність яких $\epsilon_s \approx 10000$ набагато перевищує відносну діелектричну проникність вакууму $\epsilon_0 = 1$, або повітря. Такими властивостями володіють сегнетоелектрики типу сегнетова сіль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, титанат барію BaTiO_3 та інші полімерні матеріали, що мають спільну назву електрети. Обмотка котушки індуктивності, що виготовлена з таких матеріалів, створює в її осерді паралельно до вісі 2, рис. 4, потік Φ вектора магнітної індукції. Цей потік пронизує осердя котушки, охоплює замкнутими траєкторіями 3, рис. 4, бічну поверхню котушки та замикається через її торці.

Покажемо різницю між різними типами діелектриків, щодо створення індуктивності. При виготовленні обмотки котушки звичайним діелектричним дротом з $\epsilon_d < 10$ прикладення до кінців дроту зовнішнього джерела електроенергії практично не змінює переорієнтацію вектора електричної індукції усередині дроту, оскільки звичайний діелектрик за своїми властивостями подібний до сухого повітря з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_d \approx 1$. У цьому випадку, внесення дроту 1, рис. 4, в зовнішнє електричне поле, що створено напругою u , не змінює його орієнтацію усередині дроту. Напрямок силових ліній електричного поля в дроті збігатиметься не з напрямом осі дроту, а – з напрямом осі 2 котушки, рис. 4. При цьому потік Φ буде циркулювати в ортогональній до вісі OO' котушки площині по траєкторіям 4, рис. 4, подібно до стрілки магнітного компаса навколо провідникового циліндра зі струмом, роль якого виконує котушка. Іншими словами, незважаючи на внесення в зовнішнє електричне поле дроту з майже ідеалізованого діелектрика, може мати місце лише незначна поляризація доменів, а не їх переорієнтація. Останнє не викликає різкого зростання сумарного електричного поля в діелектриці внаслідок хаотичної направленості електричних моментів його окремих диполів.

Визначимо компонентне рівняння сегнетоелектричної котушки індуктивності. Виходячи з описаного вище принципу функціонування трансфілдера T_{iu}^2 , будемо вважати, що до полюсів котушки підключено синусоїдне джерело струму I . Цей струм, підводиться до сегнетоелектричної котушки металевими провідниками. В точках приєднання цих провідників до котушки на її кінцях будуть накопичуватись різноіменні заряди, які породжують електричне поле тобто потік вектора електричної індукції. За нульових початкових умов інтегральна напруга між кінцями котушки може бути визначена за формулами (3) та (4).

$$U = U_L + U_c = I \cdot j\omega L + I \cdot \frac{1}{j\omega C} = I(jX), \quad (11)$$

де U – напруга на котушці, а

$$X = x_L - x_c = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (12)$$

повний реактивний опір котушки, що повністю узгоджується з теорією електричних кіл. Параметри котушки L та C визначаються через геометричні розміри та матеріальні параметри середовища в такий самий спосіб, як і для котушки з металевого дроту та ємності між кінцями сегнетоелектричного дроту спіралеподібної форми [10, 11].

Приклад 2. Структурі перетворення типу $T_{i,u}^2$ не обмежуються двополюсними компонентами. Під цей тип підпадають і трансформатори (чотиріполюсники), схематичне перетворення потоків в яких показано на рис. 5.

На циліндричній поверхні (можна на феритовому стрижні) виділяється вхідне та вихідне електричне коло. До вхідного ЕК належить обмотка з $W_{вх}$ обвитками, що створює магнітний потік Φ . Концентруючись усередині обмотки, цей магнітний потік у відповідності з рис. 2, а, породжує навколо себе потік вектора електричної індукції, що концентрується у вигляді тороподібного віртуального кільця, яке представляє собою один із елементів вихідного ЕК. У вертикальній площині розрізу котушки силові лінії електричного поля, що позначені як \otimes , спрямовані від нас, а \ominus – точкою в кружечку – до нас. Створене електричне поле реєструється іншою частиною трансфілдера – вихідним ЕК. Конструктивно вихідне ЕК може мати різну конфігурацію: 1 – обмотка, що намотана металевим провідником; 2 – обмотка, що намотана сегнетоелектричним провідником; 3 – радіальні металеві пластини; 4 – радіальні неметалеві пластини. Кожний із таких пристроїв може мати певне прикладне застосування. Зокрема, варіант 1 відповідає конструкції звичайного трансформатора. Варіант 2 відповідає трансформатору з ємнісним виходом, конструкція якого з точністю до інверсного варіанта відповідає трансформатору з ємнісним входом [8]. Варіанти (3 та 4) можуть бути застосовані в різноманітних чутливих елементах виконавчих механізмів та датчиках медичного обладнання.

Розглянемо перетворення потоків векторів індукції в чотиріполюсних трансфілдерах, рис. 5. Нехай вихідне коло складається з двох радіальних пластин (РП) РП1 та РП2 (зафарбовані зеленим кольором), які не мають гальванічного контакту між собою. РП1 та РП2 розташовані в круговому потоці вектора електричної індукції N , зміна у часі якого викликає струм зсуву між ними. Цей струм у відповідності з законом повного струму відводиться провідниками і створює у вихідному ЕК $i_{вих}$ ($u_{вих}$). У випадку, коли вторинне коло складається з однієї пари РП, у ньому виникає струм та відповідно падіння напруги на опорі навантаження. Якщо РП багато (подібно до спиць велосипедного колеса), то з'єднавши їх пари послідовно, можна збільшити напругу, величина якої може перевищувати напругу на вході, яка створюється за рахунок течії струму $i_{вх}$ в котушці вхідного ЕК – $W_{вх}$. Якщо ж РП вихідного кола поєднати паралельно, то матимемо пристрій, який може підсилити величину вихідного струму.

Розташування РП відносно вхідної обмотки в залежності від конкретної реалізації може бути різним: вище, як вказано на рис. 5; нижче; усередині котушки зі струмом $i_{вх}$; зовні; комбінація зазначених видів розташування. Головним чинником вибору місця розташування РП слід вважати максимізацію струму, який досягає найбільших значень у місцях максимального потоку вектора електричної індукції. Таким чином,

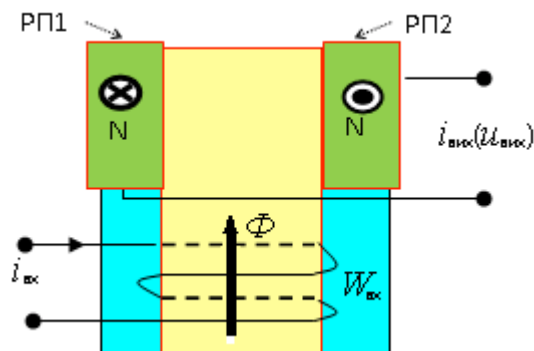


Рисунок 5 – Схема конструкції перетворювача струму

користуючись системним методом, що ґрунтується на рівняннях Максвелла [5, 6], ми отримали результати, які цілком узгоджуються з відомими фактами, що мають місце в індуктивних трансформаторах гетерогенного типу (на вході струм, на виході напруга). Для переходу до таких трансформаторів вторинне ЕК на схемі рис. 5 слід подати у вигляді вторинної обмотки, що намотана металевим провідником.

Як і в прикладі 1, розглянуті методи формування вихідного кола трансфілдера, рис. 5, складають основу розробки різноманітних класів функціональних перетворювачів, де як джерело пульсуючого електричного поля, так і реєстратори магнітного потоку можуть мати різну фізичну, хімічну, або навіть біологічну природу та внутрішню структуру.

Зауваження 1. У рамках структурних перетворень, рис. 1, можна розглядати пристрої, що реєструють електричне поле не провідниками, а напівпровідниками та діелектриками, наприклад, оптоволоконом, анізотропними речовинами, що змінюють поляризацію тощо. При цьому можна комбінувати та використовувати як джерела магнітного потоку не лише провідникові, а й інші джерела, наприклад пульсари магнітного поля, діелектричні котушки тощо.

Зауваження 2. Запропонована в прикладі 1 котушка характеризується нульовою реактивною провідністю на частоті $f = 0$, тобто вона не проводить постійний струм, оскільки незмінне у часі електричне поле сегнетоелектричного дроту не породжує струм зсуву, а разом з ним і магнітний потік Φ через осердя котушки, джерелом якого і є виключно змінне у часі електричне поле. Якісно нова властивість котушки індуктивності спрощує схеми обробки сигналів, оскільки при цьому відпадає необхідність розробки додаткових підсхем розв'язки електричних ланцюгів, що задають робочі точки напівпровідникових приладів на постійному струмі.

У даній статті отримало подальший розвиток теоретичне обґрунтування функціонування як двополюсних, так і багатополісних реактивних компонентів на основі дослідження взаємоперетворень потоків індукції електромагнітних полів пасивних реактивних компонентів. Запропоновані способи та методи їх реалізації.

У роботі запропоновано виготовлення обмоток котушок індуктивності сегнетоелектричним дротом, отримано компонентне рівняння та детально описані фізичні процеси взаємоперетворення потоків векторів електричної та магнітної індукції. Внаслідок запропонованих змін слід очікувати зменшення енергетичні втрати, що призводить до збільшення добротності та розширення верхньої межі частотного діапазону застосування пасивних реактивних компонентів. Крім того зменшується їх вартість за рахунок заміни дорогіших металів на сегнетоелектричну кераміку.

Зазначені властивості запропонованої котушки індуктивності сприятимуть розширенню компонентної бази, якості, функціональності та надійності широкого спектра електронних пристроїв, як в електроенергетиці, та і високочастотній мікроелектроніці.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кудря В.Г. Зasadничі принципи систем проектування наноелектронних виробів / В.Г. Кудря, Ю.О. Лемехов // Східно-Європейський журнал передових технологій. Інформаційні технології. – Том 1. – № 2(61). – Харків, 2013. – С. 7–11. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6998/6039>
2. Kudrya V. G. Development of adaptive algorithms for analysis of high-speed electronic devices / V.G. Kudrya., M.M. Maksynjov // II International STC Computational Intelligence (results, problems and prospects) 14 - 18 May 2013 in Cherkasy, Ukraine, 2013. P. 318–319
3. Кудря В.Г. Моделі мережевих структур наноелектронних пристроїв / В.Г. Кудря, В.В. Лановий // Міжнародна НТК «Системний аналіз та інформаційні технології»; НТТУ «КПІ» 27-31 травня 2013 р. SAIT 2013 Київ. <http://sait.kpi.ua/books/sait2013.ebook.pdf/view>.
4. Кудря В.Г. Траснфілдери потоків векторів індукції електромагнітного поля реактивних компонентів / В.Г. Кудря // Східно-Європейський журнал передових технологій. Інформаційні технології. – Том 6, № 12(66) (2013) <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19691>.
5. Князь А.И. Электродинамика информационных систем / Князь А.И. – М.: Радио и связь, 1994. – 392 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Бессонов Л.А. // М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.

7. Кудря В.Г. Моделирование нанотехнологических электронных засобів. Монографія /Кудря В.Г. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 780 с. Доступ: каталог <http://www.nbu.gov.ua/>
8. Пат. 95381 Україна. Ємнісний трансформатор. / Заявники: Кудря В.Г., Кудря С.П. Патентовласник – ОНАХТ. Номер заявки: u 2014 06627, Номер патенту 95381. 25.12.2014, Оуб. 25.12.2014. Бюл.№ 24.
9. Вольман В. И. Техническая электродинамика / В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. – М.: Связь, 1971. – 488 с.
10. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л., Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Ленинград: Энергоатомиздат. – 1986.– 488 с.
11. Иоссель Ю.Я. Расчёт электрической ёмкости / Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 288 с.

REFERENCES:

1. Kudrya V. Lyemyehov Y. *Fundamental principles of designing nanoelectronic products*. // *Eastern European Journal of advanced technologies // Information technologies*. Volume 1, № 2 (61). Kharkiv, 2013. – P. 7– 11. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6998/6039>
2. Kudrya V, Maksynjov M. Development of adaptive algorithms for analysis of high-speed electronic devices. // Abstracts. II International STC Computational Intelligence (results, problems and prospects) 14 – 18 May 2013 in Cherkasy, Ukraine, 2013. – P. 318– 319.
3. Kudrya V., Lanovij V. Models of network structures nanoelectronic devices. // System Analysis and Information technologies: Materials of the 15th International scientific and technical conference SAIT 2013, Kyiv, 27-31 May 2013 / - K. ESC "IPSA" NTU "KPI", 2013. – P. 353 Electronic document: <http://sait.kpi.ua/books/sait2013.ebook.pdf/view>
4. Kudrya V. *Trasnfildery flow induction electromagnetic field vectors reactive components* / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies // Information technologies*. Volume 6, № 12 (66) (2013).
5. A.I. Knyaz . *Electrodynamics information systems*. – М.: Radio and Communications, 1994. – 392 p.
6. Bessonov L.A. *Theoretical bases of electrical*. – М.: Higher School, 1973, 752 p.
7. Kudrya V. Modeling of nanotechnology electronic means. Monograph / V.G. Kudrya // ONAFT, Ukraine, Kherson: Oldie-Plus, 2013. 780 p. Access - catalogs <http://www.nbu.gov.ua/>
8. VG Kudrya Capacitive Transformer // Application Number: u 2014 06627, patent number 95381. 12.25.2014, Byul.№ 24.
9. Wolman V., Pimenov V. Technical electrodynamics. / М .: Communications, 1971. – 488 p.
10. Kalantarov P., Zeitlin L. Calculation of inductances / Leningrad,; Energoatomisdat – 1986. – 488 p.
11. Iossel Y., Kachanov E., Strunskaya M. Calculation of capacitance. Leningrad: Energoizdat, 1981. – 288 p.