
ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.313

О.Н. ВОЙЦЕХОВСЬКИЙ, Н.Л. ДОН, О.О. ДЕМЧЕНКО
Херсонський національний технічний університет**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ ТА ЕФЕКТУ БЛИЗЬКОСТІ
ДВОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ**

Експериментально підтверджено методи дослідження електромагнітних полів у струмопровідних системах та провідних елементах різноманітних геометричних форм та перерізу. Підтверджено виникнення поверхневого ефекту та ефекту близькості при зближенні струмопроводів різних конфігурацій. Отримано етюри розподілу напруженості електромагнітного поля. Наведена методика дослідження електромагнітного поля в двопровідній лінії може бути використана при проведенні лабораторного практикуму з теоретичних основ електротехніки.

Ключові слова: поверхневий ефект, ефект близькості, двопровідна лінія.

А.Н. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Н.Л. ДОН, А.А. ДЕМЧЕНКО
Херсонский национальный технический университет**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ
ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ**

Экспериментально подтверждены методы исследования электромагнитных полей в токопроводящих системах и проводящих элементах различных геометрических форм и сечения. Подтверждено возникновение поверхностного эффекта и эффекта близости при сближении токопроводов различных конфигураций. Получены этюры распределения напряженности электромагнитного поля. Приведенная методика исследования электромагнитного поля в двухпроводной линии применима в лабораторном практикуме по теоретическим основам электротехники.

Ключевые слова: поверхностный эффект, эффект близости, двухпроводная линия.

А.Н. VOYTSEKHOVSKIY, N.L. DON, O.O. DEMCHENKO
Kherson National Technical University**STUDY OF SURFACE EFFECT AND EFFECT OF NEIGHBORNESS
OF A TWO-WIRE LINE**

Experimentally confirmed methods for the study of electromagnetic fields in conductive systems and conductive elements of various geometric shapes and cross sections. The appearance of the surface effect and the proximity effect upon the convergence of conductors of various configurations is confirmed. Diagrams of the electromagnetic field intensity distribution are obtained. The given method of studying the electromagnetic field in a two-wire line is applicable in a laboratory workshop on the theoretical fundamentals of electrical engineering.

Keywords: surface effect, proximity effect, two-wire line.

Постановка проблеми

На сучасних надпотужних електричних станціях та в електротермічних установках економічні показники пристроїв в основному визначають струмопроводи. При достатньо високих струмах нерациональна конструкція струмопроводу може призвести до значних втрат електричної енергії, перегріву струмонесучих шин та екранів, виходу струмопроводу із ладу.

Нерівномірний розподіл струму за перерізом струмопроводу (шини) внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості [1] призводить до збільшення їхнього активного опору, який слід враховувати при проектуванні електричних машин та струмопроводів [2]. Саме тому питання розрахунку потужних шинопроводів з урахуванням поверхневого ефекту та ефекту близькості є актуальним [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Практично задачі такого спрямування зустрічаються досить часто: при розрахунках струмопровідних систем та високовольтних кабельних ліній для передачі енергії; розрахунках струмопровідних частин комутаційних апаратів, призначених для вмикання, вимикання, перемикання в

електроенергетичних системах з високими номінальними струмами та напругами; розрахунках електромагнітних екранів для вирішення низки задач електромагнітної сумісності та екології. Роботи в цьому напрямку виконували К.С.Демирчян, М.В.Костенко, В.М.Юрінов, А.М.Костромінов, Н.В.Коровкін, Д.В.Вілесов, Б.В.Єфімов, К.А.Бочков, В.А.Раков, С.В.Ткаченко та інші [1-3].

Чисельні методи моделювання кіл з розподіленими параметрами, як довгих ліній, базувались, як правило, на наближенні телеграфних рівнянь чи на принципі антени, але зазначені методи у більшості випадків не враховували як явище поверхневого ефекту, так і ефект близькості [4]. В зв'язку з цим актуальними є експериментальні дослідження кіл з розподіленими параметрами, що враховують зазначені фізичні ефекти.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в розробці нових та удосконаленні відомих методів дослідження електромагнітних полів у струмопровідних системах та провідних елементах. Такі дослідження дозволять враховувати варіювання геометричних і електрофізичних параметрів для оптимізації та автоматизації проектування електротехнічних пристроїв та апаратів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Змінне електромагнітне поле швидко послаблюється в провідному середовищі, що призводить до нерівномірного розподілу поля всередині магнітопроводу і до нерівномірного розподілу магнітного потоку в перерізі: на осі магнітопроводу густина магнітного потоку мінімальна, тоді як на поверхні – максимальна. Явище нерівномірного розподілу поля по перерізу провідника, зумовлене затуханням електромагнітної хвилі, називається поверхневим ефектом [1].

Якщо в просторі такого провідника міститься інший провідник зі струмом, спостерігається взаємний вплив провідників на електромагнітні поля, створювані цими провідниками, що призводить до зростання активного опору такого провідника. Вплив провідників зі струмом, що знаходяться поряд, на комплекс опору досліджуваного провідника називається ефектом близькості [1].

Ефект близькості має місце в двопровідній лінії у вигляді двох плоских шин прямокутного перерізу, розташованих паралельно та повернутих одна до одної широкими гранями при відносно малій відстані між ними (рис. 1) [3, 4].

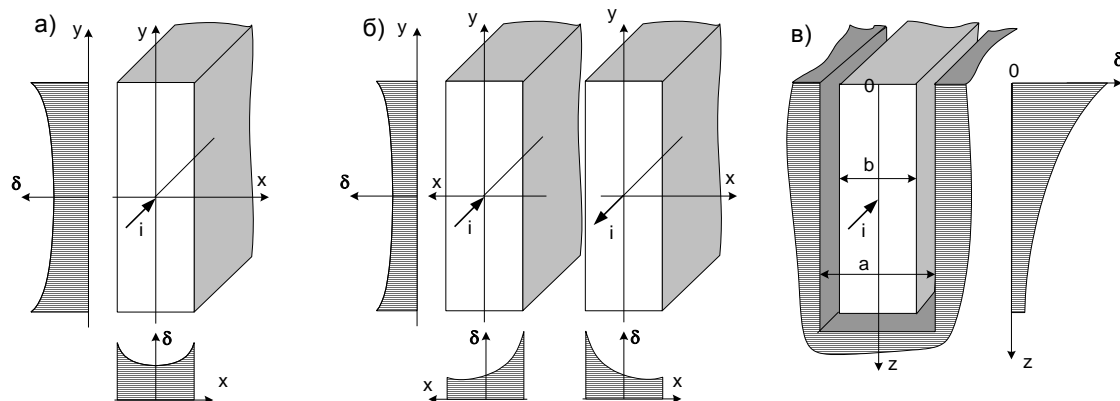


Рис. 1. Пояснення поверхневого ефекту та ефекту близькості [4]

Вплив поперечної електромагнітної хвилі призводить до нерівномірного розподілу напруженості магнітного (H) та електричного (E) полів, густини струму (δ) по перерізу шини.

Якщо відстань між шинами ($2b$) одного порядку з товщиною шин ($2a$) і набагато менша за висоту ($2b \ll h$), то можна експериментально підтвердити, що напруженість магнітного поля в просторі між шинами вдвічі перевищує напруженість магнітного поля однієї шини безпосередньо поряд з нею.

У просторі поза шинами, згідно до принципу накладання, напруженість магнітного поля зменшується до нуля, оскільки в просторі між шинами напруженості додаються, ззовні – віднімаються. Якщо не враховувати викривлення поля гранями шини, то електромагнітна хвиля в кожную із шин проходить лише через внутрішні поверхні, повернуті одна до одної. Через зовнішні поверхні електромагнітна хвиля не проходить, E і δ будуть мінімальними, і H , згідно до закону повного струму, має бути рівною нулю [4].

Максимальна густина струму повинна спостерігатись на поверхні шини та спадати до центру перерізу (рис.1, а). В двох близько розташованих шинах з протилежно спрямованими струмами має місце взаємне витіснення струмів на поверхні шин (рис.1, б). За умови однакового напрямку струму в двох таких шинах витіснення струмів спрямовується на зовнішні поверхні шин. В провіднику, укладеному в

феромагнітний паз ротора чи статора електричної машини відбувається витіснення струму на відкриту поверхню провідника (рис.1, в).

В роботі проводились дослідження розподілу струму в шинах двопровідної лінії у вигляді двох однакових за геометрією паралельно розташованих провідників круглого, квадратного, прямокутного та стрічкового перерізу, по яким пропускався струм як однаковий, так і різного напрямку.

Поведінка E і δ досліджувалась експериментально шляхом підпайки до точок А і В (рис.2) провідного контуру. Зміна напруженості електричного поля E оцінювалась за вольтметром, тоді як підключення амперметра дозволило оцінити зміну δ .

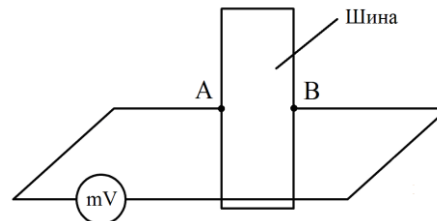


Рис. 2. Принципова схема пристрою з вимірювання напруженості електричного поля

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис.3. До її складу входили мідні шини розмірами $300 \times 30 \times 4$ мм. Послідовне з'єднання шин досягалось згином навпіл смуги довжиною 600 мм із зазором $2 \div 3$ мм.

В центрі верхньої шини прорізано наскрізний отвір розміром 20×3 мм (рис.3, а). В отвір піпеткою вносились вода. Герметичність отвору забезпечувалась прокладеною знизу шини гумовою прокладкою (рис.3, б). Збільшення струму в шині повинно впливати на стан залізних ошурків на поверхні води, – вони мають вишикуватись вздовж силових ліній магнітного поля (рис.3, в).

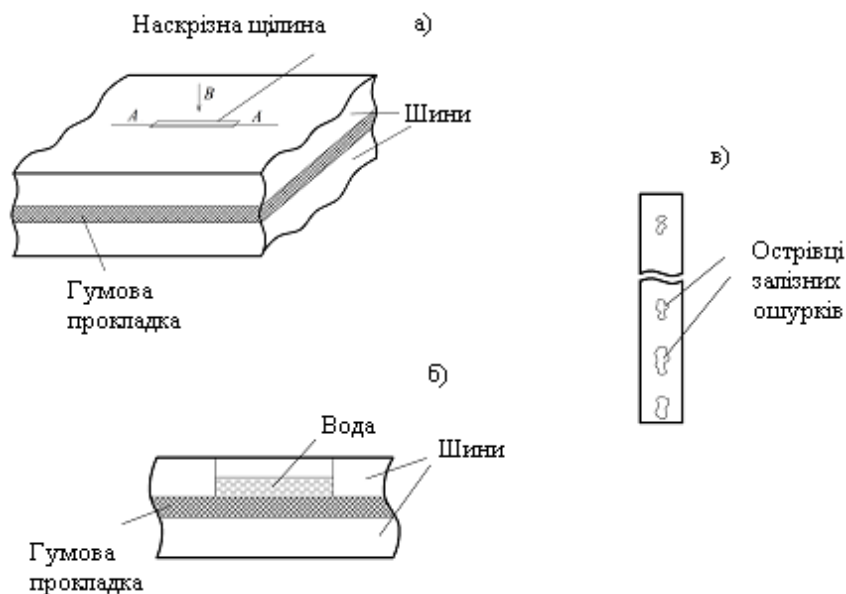


Рис. 3. Принципова схема установки

Для випадку стрічкових провідників, зокрема, розглядалися декілька варіантів їхнього взаємного розташування при експериментальному дослідженні розподілу струму вздовж ширини двох близько розташованих прямокутних шин (рис.1, б).

Експериментально отримано епюри H , E , δ безпосередньо в структурі шини (рис.4.) та для простору навколо шин (рис.5).

За умови малої відстані стрічкові провідники можна розглядати як дві близько розташовані шини системи (рис.4, а). При такому розташуванні стрічкові провідники можна з достатньою точністю розглядати як випадок горизонтального розташування шин, вздовж горизонтальної осі яких має сильно проявлятися ефект близькості.

У випадку достатньо великої відстані поміж стрічковими провідниками отримано розподіл густини струму в них, близький до розподілу струму одиничної прямокутної шини (рис.4, б). Ефект близькості є незначним і майже не проявляється.

Дослідження показали, що зі збільшенням σ , μ , і ω прояви поверхневого ефекту та ефекту близькості є сильнішими, тобто більш нерівномірним стає розподіл густини струму по перерізу шини. Подальше збільшення частоти ω може призвести до протікання струму лише по тонкому поверхневому шару струмопроводу. При незначній товщині шини та відносно малій частоті активний опір шини незначно зростає і поверхневий ефект був слабо виражений, порівняно із попередніми дослідями при підвищених частотах.

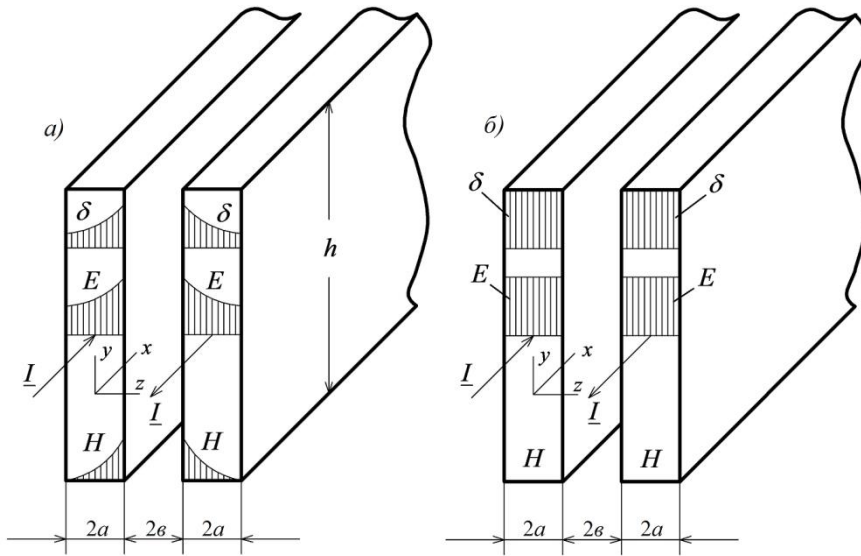


Рис. 4. Епюри залежності $H = f(z)$, $E = f(z)$, $\delta = f(z)$

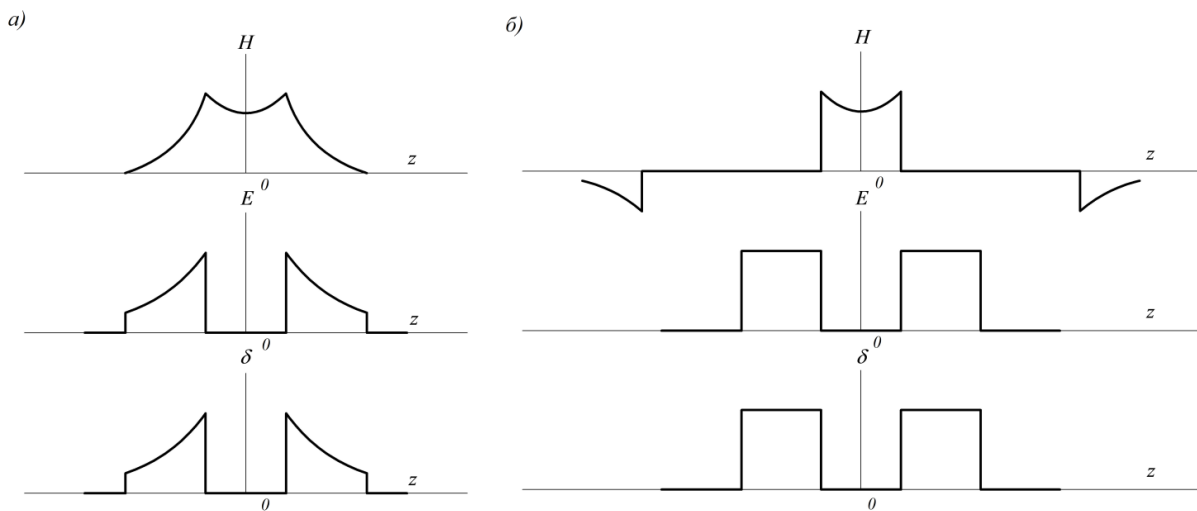


Рис. 5. Розгортка залежності $H = f(z)$, $E = f(z)$, $\delta = f(z)$

Збільшення струму, що проходив по шинам, не змінювало стану залізних ошурків на поверхні води, – вони зберігали свій стан спокою та не шикувались вздовж силових ліній магнітного поля. Це означало відсутність магнітного поля всередині шин, хоча у просторі поміж ними магнітне поле досить яскраво відслідковується. При цьому магнітні силові лінії, охоплюючи шину, замикаються досить далеко за її межами, формуючи безпосередньо за шиною область магнітного вакууму (рис.5, б). Далі вже магнітне поле виявляється внаслідок замикання магнітних силових ліній, що охоплюють шини.

Висновки

З урахуванням отриманих експериментальних даних можна зробити наступні висновки:

- максимум напруженості магнітного поля формується в зоні повітряного проміжку поміж шинами;
- в шинах магнітне поле відсутнє;
- силові лінії магнітного поля, замикаючись навколо шин, створюють деяке зрідження («магнітний вакуум»), тобто на певній відстані від шини магнітне поле з'являється зі зміною як напрямку, так і величини.

Отже, в роботі отримали експериментальне підтвердження методи дослідження електромагнітних полів у струмопровідних системах та провідних елементах різноманітних геометричних форм круглого, прямокутного, квадратного та стрічкового перерізу. Такі дослідження дозволять враховувати варіювання геометричних і електрофізичних параметрів для оптимізації та автоматизації проектування електротехнічних пристроїв та апаратів.

На кафедрі енергетики, електротехніки і фізики Херсонського національного технічного університету продовжується робота над дослідженнями, започаткованими професором [О.В.Китаєвим] [5], в основі яких реалізується методологічний принцип теоретичної електротехніки, що відрізняє її від інших дисциплін – перехід до схем заміщення, що моделюють складні процеси та явища в електротехнічних пристроях та процедури їх розрахунку. Наведена методика дослідження електромагнітного поля в двопровідній лінії може бути використана при проведенні лабораторного практикуму з теоретичних основ електротехніки.

Список використаної літератури

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник для вузов. / Л.А.Бессонов. – М.: Высш. школа, 1986. - 263 с.
2. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / Пер. с англ. И.И. Талалова. М.: Энергия, 1970. - 376 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1969. - 304 с.
4. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля / В.А.Говорков. – М.: ГЭИ, 1960. 462 с.
5. Китаев А.В. Магнитное поле проводников с током на основе экспериментальных данных / А.В.Китаев, А.Н.Войцеховский, С.А.Войцеховский // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 07(83). – С.58–63.