

УДК 537.8

Козлов В.В.¹, Набокова О.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЩО ТАКЕ СКІН-ЕФЕКТ І ДЕ ВІН ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ НА ПРАКТИЦІ

Поверхневий ефект, скін-ефект – це ефект зменшення амплітуди електромагнітних хвиль у міру їх проникнення вглиб провідного середовища. Внаслідок цього електромагнітного явища, наприклад, змінний струм високої частоти при протіканні по провіднику розподіляється не рівномірно по перерізу, а переважно в поверхневому шарі. Це викликає зменшення щільності струму в міру віддалення від периферії провідника.

Щільність струму максимальна біля провідника. При віддаленні від поверхні вона зменшується за експоненціальним законом і на глибині δ стає менше в e раз (приблизно на 70 %). Цю глибину називають товщиною скін-шару. Вона дорівнює

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \mu \cdot \omega}}, \quad (1)$$

де γ - питома електрична провідність, μ - магнітна проникність, ω - кругова частота зміни електромагнітного поля.

Чим вища частота струму, або більше швидкість його зміни в часі, тим сильніше виявляється скін-ефект.

Скін-ефект призводить до зменшення діючого перерізу провідника і, як наслідок, до збільшення опору провідника, індуктивність провідника при цьому зменшується.

Поверхневий ефект зумовлений наступним. Електрони, що рухаються біля поверхні провідника і вносять свій внесок у електричний струм, піддаються дії магнітного потоку від інших електронів, що рухаються, меншою мірою, ніж ті електрони, які знаходяться в провіднику на великих глибинах. Це пояснюється тим, що поверхневі електрони зазнають впливу сусідніх електронів тільки з одного боку, тоді як глибинні електрони оточені сусідніми електронами з усіх боків. Оскільки глибинні електрони, що у створенні змінного струму, перебувають під впливом сильнішого магнітного поля, до них прикладені значні сили Ленца.

Отже, для електронів легше змінити свій рух, якщо вони знаходяться поблизу поверхні провідника, в порівнянні з електронами, що знаходяться глибше. Оскільки носії завжди вибирають оптимальну траєкторію, яка відповідає умові мінімальної енергії, у цьому випадку носії, що утворюють змінний струм, під дією бокових сил Ленца переміщуються назовні, в область мінімальної взаємної індукції, тобто до поверхні провідника. Градієнт індуктивності всередині провідного тіла обумовлює зміну фазового кута вздовж поперечного перерізу тіла. Не виключається навіть можливість протилежних напрямів руху електронів у різних частинах одного і того ж тіла.

Аналогічні явища спостерігаються при виникненні ефекту близькості, в основі якого лежить перерозподіл носіїв, що зумовлюють змінний струм, при зближенні двох провідників. Носії заряду, що рухаються в одному з провідників, створюють сили, що впливають на носії в іншому провіднику, розташованому поблизу. В наслідку цього носії заряду в кожному з провідників переміщуються в положення, що відповідає мінімуму взаємної індуктивності.

Як скін-ефект, так і ефект близькості призводять до перерозподілу носіїв, еквівалентного зменшення площі поперечного перерізу провідника, через який тече струм. Наслідком цього є збільшення опору провідника, причому опір буде тим більше, чим вище частота змінного струму.

Скін-ефект проявляється суттєвіше зі збільшенням частоти змінного струму. Його вплив враховують при конструюванні та розрахунках електричних схем, що працюють на змінному та імпульсному струмах.

Для зменшення впливу скін-ефекту застосовують провідники різного перерізу: плоскі (у вигляді стрічок), трубчасті (порожнисті всередині), наносять на поверхню провідника шар металу з нижчим питомим опором. Наприклад, срібло яке має найбільшу питому провідність серед усіх металів

і, одночасно, технологічно для нанесення на металеві поверхні. Тонкий його шар, в якому через скін-ефект і протікає більша частина струму, надає помітне зниження (до 10 %) активного опору провідника.

Для зниження дії скін-ефекту в лініях електропередачі на повітряних лініях напругою 330 кВ і вище фазний провід виконують з декількох проводів, підвішених паралельно на деякій відстані один від одного. Такі фазні дроти називаються розщепленими. Одиночний дріт, що використовує таку ж кількість металу на кілометр, матиме більші втрати через скін-ефект.

Наприклад, якщо (згідно з розрахунками) на лінії повинен монтуватися провід перетином 120 мм^2 , то замість нього можна використовувати два дроти перетином по 50 мм^2 кожен. В результаті такої заміни одержують 20 % економії провідникового матеріалу (за вагою), а провідні властивості лінії навіть стають кращими. Дійсно, неважко підрахувати, що провід перетином 120 мм^2 має довжину кола 39,2 мм. У дроту ж перетином 50 мм^2 довжина кола становитиме 25,1 мм. Для двох таких дротів загальна довжина кола становитиме $25,1 \times 2 = 50,2 \text{ мм}$. Оскільки струм тече по поверхні, то звісно, що активний опір двох паралельних включених проводів перетином 50 мм^2 кожен буде менше, ніж активний опір одного дроту перетином 120 мм^2 . Одночасно питома вага погонного метра лінії зменшується на $(120 - 2 \times 50) \times 100 / 120 = 16,7 \%$.