

УДК 621.316.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155672

## Визначення додаткових втрат потужності в системі електропостачання від вищих гармонік струму

О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. М. Рищенко, О. Є. Зінченко,  
С. М. Тихонравов, Д. А. Гордієнко

*Представлено результати досліджень впливу вищих гармонік струму навантаження на втрати потужності в електричній мережі. Актуальність цих досліджень зумовлена сталим зростанням кількості потужних імпульсних споживачів електроенергії, що призводить до збільшення вмісту вищих гармонік в системах електропостачання. В свою чергу, вищі гармоніки струму навантаження в системі електропостачання викликають погіршення не тільки якісних показників електроенергії, а й збільшення втрат потужності, що спричинено скін-ефектом в провідниках мережі та збільшенням середньоквадратичного значення струму.*

*Проведені дослідження показали, що існуючі аналітичні залежності активного опору мережі від частоти вищих гармонік струму під дією скін-ефекту є взаємовиключними та неточними з причини невраховування геометричних характеристик провідників мережі. На підставі рівнянь Бесселя першого роду отримано уточнені аналітичні залежності активного опору мережі від частот вищих гармонік, що враховують геометричні властивості провідів. Показано, що інтенсивність збільшення активного опору провідника відносно його опору постійного струму при заданій частоті значно залежить від діаметру провідника, що особливо важливо для ліній передачі енергії з одножильними дротами великого діаметру (наприклад, контактний дріт у залізничному електропостачанні). Показано, що для дротів малого діаметру збільшення значення активного опору під дією скін-ефекту є несуттєвим і, у такому випадку, втрати від вищих гармонік струмів зумовлені збільшенням середньоквадратичного значення струму. Представлено залежність додаткових втрат потужності в електричній мережі у функції значень коефіцієнту гармонічних спотворень струму навантаження. Приведені залежності підтверджено імітаційним моделюванням.*

*Отримані результати дослідження можуть бути використані при розрахунках енергетичних втрат в різноманітних електричних мережах від вищих гармонік струмів навантаження та при розрахунках економічної ефективності від впровадження фільтрокомпенсуючих пристроїв*

*Ключові слова: вищі гармоніки струму навантаження, втрати потужності, коефіцієнт гармонічних спотворень, скін-ефект*

## 1. Вступ

Підвищення енергоефективності є пріоритетним напрямком енергетики та систем електропостачання. Для реалізації максимальної енергоефективності систем електропостачання необхідне чітке чисельне розуміння складових втрат потужності і методів їх усунення. У тому числі, необхідне розуміння вкладу у втрати потужності від вищих гармонік струму навантаження у величину загальних втрат. Це важливо, бо протягом останніх десятиліть відбувається збільшення кількості імпульсних споживачів електроенергії, що відноситься як до побутових приладів, так і до промислових. Це призводить до збільшення вмісту вищих гармонік струмів в системах електропостачання, а, відповідно, і до збільшення втрат потужності, пов'язаних з вищими гармоніками, що зумовлює необхідність використання активних випрямлячів та активних фільтрокомпенсуючих пристроїв [1-3]. Все це зумовлює актуальність проблеми визначення додаткових втрат потужності в системі електропостачання, визначених вищими гармоніками струмів навантаження.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питанням негативного впливу вищих гармонік та неактивних складових струмів навантаження на системи електропостачання приділено значну увагу [4–8]. Проте, варто зазначити, що результати розрахунків додаткових втрат в активному опорі електричних мереж від вищих гармонік струмів у ряді публікацій [9–13] значно відрізняються.

Додаткові втрати активної потужності у трифазній лінії електропередачі  $P_{\text{harm}}$ , обумовлені протіканням струмів вищих гармонік, визначаються дією скін-ефекту та можуть бути визначені, як сума втрат від кожної гармоніки:

$$P_{\text{harm}} = 3 \cdot \sum_{v=2}^{v=n} I_v^2 \cdot R_1 \cdot k_{rv}, \quad (1)$$

де  $v$  – номер гармоніки;  $n$  – число врахованих гармонік;  $I_v$  – середньоквадратичне значення  $v$ -ої гармоніки;  $R_1$  – активний опір лінії постійному струму;  $k_{rv}$  – коефіцієнт, що враховує збільшення опору під дією поверхневого ефекту.

Проте визначення коефіцієнту  $k_{rv}$ , що враховує вплив поверхневого ефекту, у публікаціях [9–12] визначається за різними виразами.

Так, у роботі [9] для коефіцієнта  $k_{rv}$  дається два різних визначення його залежності від порядку гармоніки  $v$ . Перше визначення коефіцієнту  $k_{rv}$  визначається як:

$$k_{rv} = 0,47 \cdot \sqrt{v}, \quad (2)$$

де  $v=f/50$ .

Друге визначення коефіцієнту  $k_{rv}$ , згідно з [9] в залежності від частоти  $v$ -ої гармоніки складає:

$$r_{0v} = r_0 \cdot (k_{pv} + k_{0v}), \quad (3)$$

де  $r_0$  – питомий опір провідника постійного струму;  $k_{pv}$  – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту на  $v$ -ій гармоніці;  $k_{0v}$  – коефіцієнт, що враховує вплив ефекту близькості для  $v$ -ої гармоніки.

Згідно з [9] коефіцієнт  $k_{pv}$ , що визначає ріст активного опору провідника на вищих частотах від поверхневого ефекту для мідних проводів, складає:

$$k_{pv} = 0,021 \cdot \sqrt{f}. \quad (4)$$

Для алюмінієвих проводів  $k_{pv}$  складає:

$$k_{pv} = 0,01635 \cdot \sqrt{f}. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $k_{0v}$ , що враховує ефект близькості, визначається за виразом:

$$k_{0v} = \frac{1,18 + k_{pv}}{k_{pv} \cdot 0,27} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2, \quad (6)$$

де  $d$  – діаметр провідника, мм;  $a$  – відстань між центрами жил, мм.

У ряді публікацій [10–12], коефіцієнт  $k_r$ , що враховує збільшення активного опору під дією скін-ефекту має більше значення та визначається як:

$$k_r = \sqrt{v}. \quad (7)$$

У публікації [13] на підставі експериментальних досліджень наведено емпіричні залежності активного опору від частоти для різних типів проводів, як це показано в табл. 1.

Таблиця 1

Апроксимуючі залежності коефіцієнта  $k_{rv2}$ , що враховує вплив скін-ефекту для різних типів кабелів

Тип провідника	$k_{rv2}$
АС-400	0,3v
А-400	0,15v
Мідний кабель	0,06v
Алюмінієвий кабель	0,06v

Залежності коефіцієнтів  $k_{rv}$ ,  $k_{rv2}$  і  $k_{pv}$  для мідного проводу від частоти наведено на рис. 1. Варто зазначити, що значення коефіцієнтів  $k_{rv}$ ,  $k_{rv2}$  і  $k_{pv}$  відповідає опору провідників постійному струму.

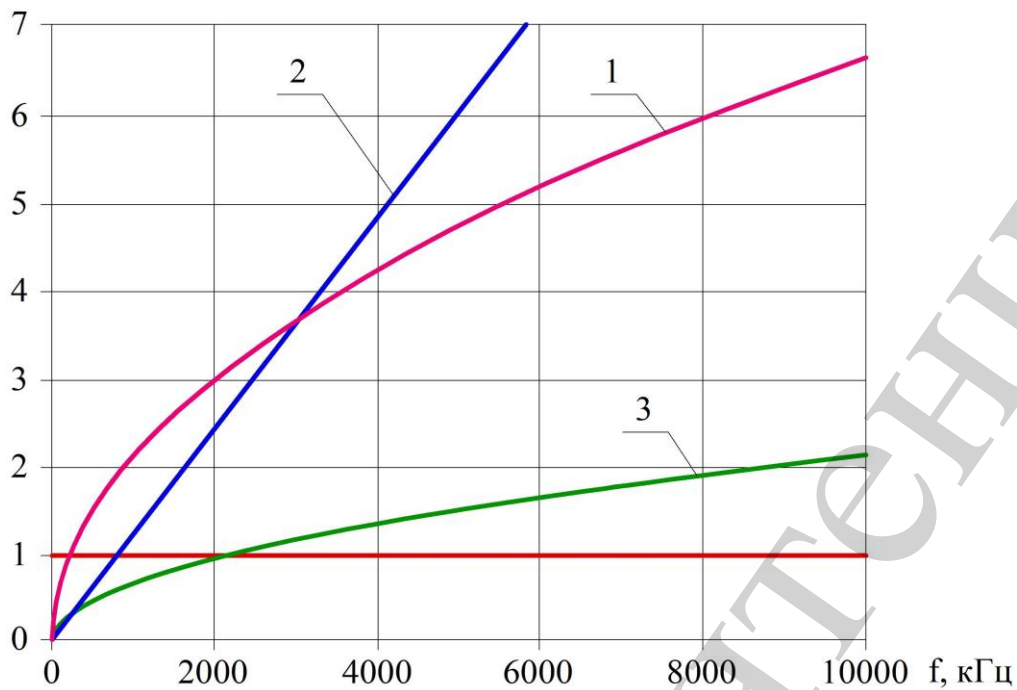


Рис. 1. Залежності значень коефіцієнтів, що враховують вплив поверхневого ефекту на збільшення активного опору, а, відповідно, і на втрати потужності у провідниках від частоти струмів вищих гармонік: 1 –  $k_{rv}$ ; 2 –  $k_{rv2}$ ; 3 –  $k_{pv}$

Таким чином, з проведеного аналізу можна зробити висновки, що існуючі залежності активного опору провідників електричних мереж від частоти вищих гармонік є досить суперечними і дають різні результати розрахунку втрат потужності. Варто зазначити, що зазначені співвідношення не враховують геометричні властивості проводів, які впливають на інтенсивність витіснення струму у провіднику при скін-ефекті. Крім цього, згідно виразів (2) та (4) і табл. 1, до певної частоти коефіцієнти  $k_{rv}$ ,  $k_{rv2}$  і  $k_{pv}$  приймають значення менше одиниці, що свідчить про зниження опору мережі відносно опору постійному струму, тобто певної «надпровідності» провідників на частоті 50 Гц, що є помилковим.

### 3. Ціль дослідження

Метою роботи є визначення аналітичних співвідношень, що описують енергетичні процеси збільшення втрат потужності в опорі електричної мережі від вищих гармонік струму.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено такі завдання:

- отримати співвідношення активного опору мережі від частоти вищої гармоніки з урахуванням геометричних показників провідників;
- отримати співвідношення додаткових втрат потужності в опорі мережі від вищих гармонік у функції від коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) (англ. Total Harmonic Distortion) струму;
- провести імітаційне моделювання та підтвердити отримані залежності додаткових втрат потужності в опорі мережі від коефіцієнту гармонічних спотворень на прикладі системи.

#### 4. Визначення впливу скін-ефекту на опір мережі виходячи з рівнянь Бесселя

Протікання змінного струму супроводжується електромагнітним полем навколо провідника, яке призводить до витіснення електричних зарядів (власне цього ж струму) від центру провідника на його поверхню. Цей ефект називається поверхневим ефектом, або скін-ефектом. В результаті цього ефекту щільність струму по площі перетину проводу стає неоднорідною. Об'ємна щільність струму максимальна біля поверхні провідника. При видаленні від поверхні об'ємна щільність убуває експоненціально і на глибині  $\Delta$  стає меншою в  $e$ -разів [14, 15]. Ця глибина  $\Delta$  називається товщиною скін-шару та визначається відповідно до виразу:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}}, \quad (8)$$

де  $\Delta$  – глибина проникнення струму (м);  $f$  – частота змінного струму, Гц;  $\gamma$  – питома електрична провідність,  $\gamma=1/\rho$ ;  $\rho$  – питомий опір провідника ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ), для міді  $1,72 \cdot 10^{-8}$ ; для алюмінію  $2,7 \cdot 10^{-8}$ ;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (9)$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}$ ;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу ( $\mu/\mu_0$  безрозмірна величина), для міді 0,999992; для алюмінію 1,000022.

Залежність товщини скін-шару мідного та алюмінієвого проводу від частоти  $f$  наведено на рис. 2.

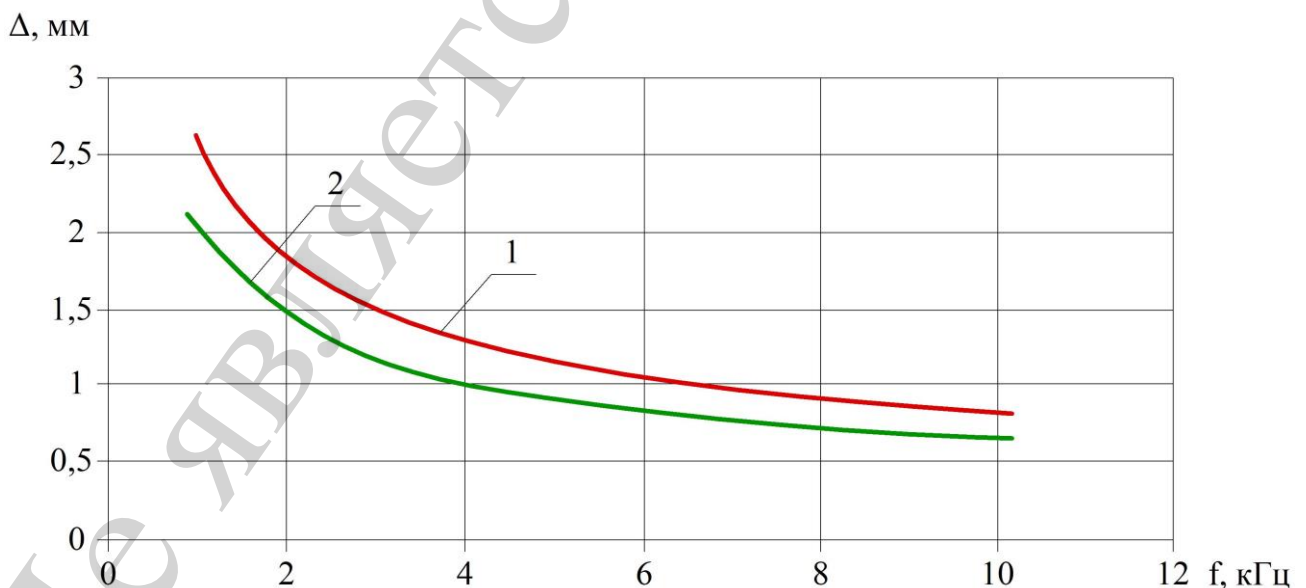


Рис. 2. Залежність товщини скін-шару (мм) від частоти струму (кГц): 1 – для алюмінію; 2 – для міді

Таким чином, при досить великій частоті  $f=10$  кГц товщина скін-шару стає мізерно малою (0,66 мм).

Для змінної напруги щільність струму  $J$  від поверхні до центру циліндричного провідника є експоненціально спадною функцією, яка описується виразом:

$$J = J_s \cdot e^{-\frac{r_k}{\Delta}}, \quad (10)$$

де  $J_s$  – провідність провідника, що відповідає постійному струму;  $r_k$  – відстань від поверхні проводу до центру.

Унаслідок експоненціального убування щільності струму слідує, що практично весь струм зосереджений в шарі товщиною в кілька  $\Delta$ . Як приклад наведемо графік розподілення відносної щільності струму в провіднику з радіусом рівним  $3\Delta$  (рис. 3).

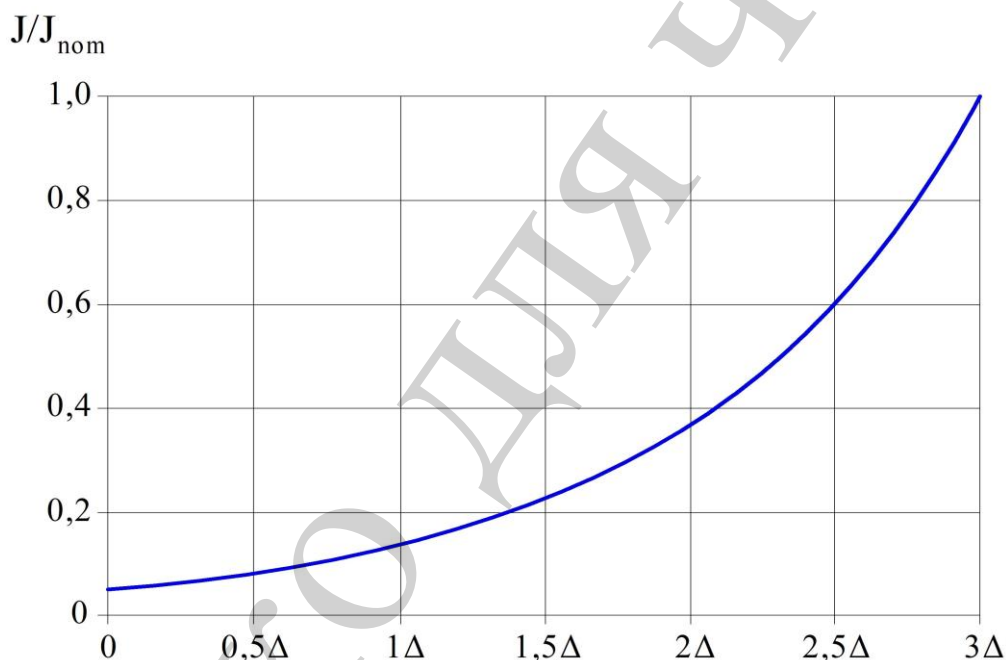


Рис. 3. Залежність розподілення відносної щільності струму в провіді товщиною  $3\Delta$

Так, зменшення щільності струму в 100 разів відбувається на глибині  $\approx 4,6 \cdot \Delta$ . Таким чином, вплив скін-ефекту на витіснення струму визначається кількістю скін-шарів в радіусі проводу  $r_0/\Delta$ . Дана неоднорідність щільності струму веде до збільшення його питомого опору.

У разі, коли радіус проводу більше товщини скін-шару, залежність комплексного опору проводу  $Z$  від частоти струму може бути описано за допомогою функції Бесселя [14–18], яка визначає поширення поля в циліндричній системі координат.

$$Z(f) = R + i \cdot X = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \gamma} \cdot \frac{J_0(q \cdot r_0)}{J_1(q \cdot r_0)} \cdot l, \quad (11)$$

де  $R$  – активний опір провідника;  $X$  – реактивний опір провідника;  $i$  – комплексна складова;  $r_0$  – радіус проводу;  $l$  – довжина проводу;  $J_0(Z)$  – функція Бесселя першого роду нульового порядку;  $J_1(Z)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $q$  – хвильове число.

Хвильове число проводу є комплексною змінною і визначається виходячи зі значення товщини скін-шару.

$$q = k - i \cdot k; \quad k = \frac{1}{\Delta}. \quad (12)$$

Функції Бесселя першого роду є частинними канонічними рішеннями диференціального рівняння Бесселя:

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2) = 0. \quad (13)$$

Функції Бесселя першого порядку, що позначаються  $J_\alpha(z)$ , є приватними рішеннями диференціального рівняння Бесселя для кінцевих точок  $x=0$  при цілих і не негативних  $\alpha$ :

$$J_\alpha(z) = \frac{z}{2} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1+\alpha)!} \cdot \left(\frac{z}{2}\right)^{2n+\alpha}. \quad (14)$$

Функції Бесселя першого роду нульового та першого порядку визначаються як:

$$J_0(z) = \frac{z}{2} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1)!} \cdot \left(\frac{z}{2}\right)^{2n}; \quad (15)$$

$$J_1(z) = \frac{z}{2} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+2)!} \cdot \left(\frac{z}{2}\right)^{2n+1}. \quad (16)$$

Примітка: рішення функцій Бесселя в комплексній площині спрощується можливістю їх вирішення в програмі MathCad за допомогою вбудованих функцій « $J_0(z)$ » і « $J_1(z)$ ».

Активний опір проводу  $R$  є дійсною частиною комплексного опору  $Z$  з виразу (10). Отримані залежності активного опору мідного проводу довжиною 10 км з різними діаметрами від частоти, розрахованої відповідно до виразу (11), наведено на рис. 4.

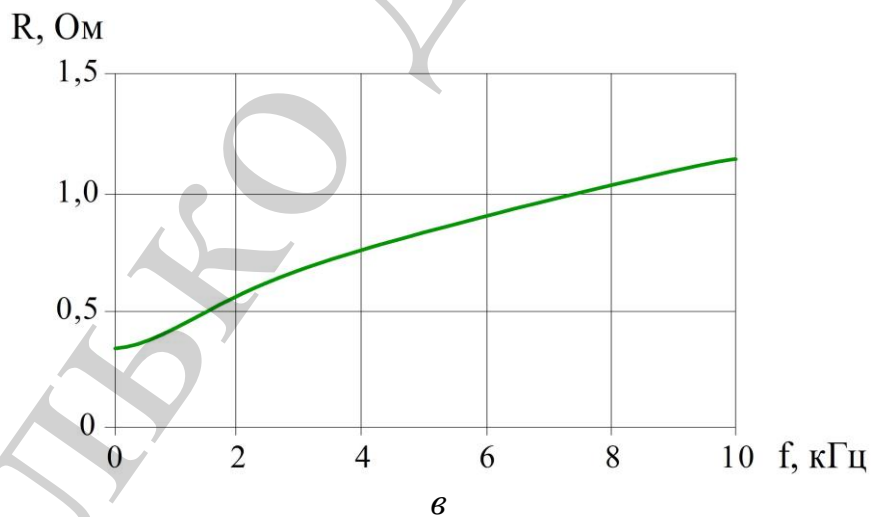
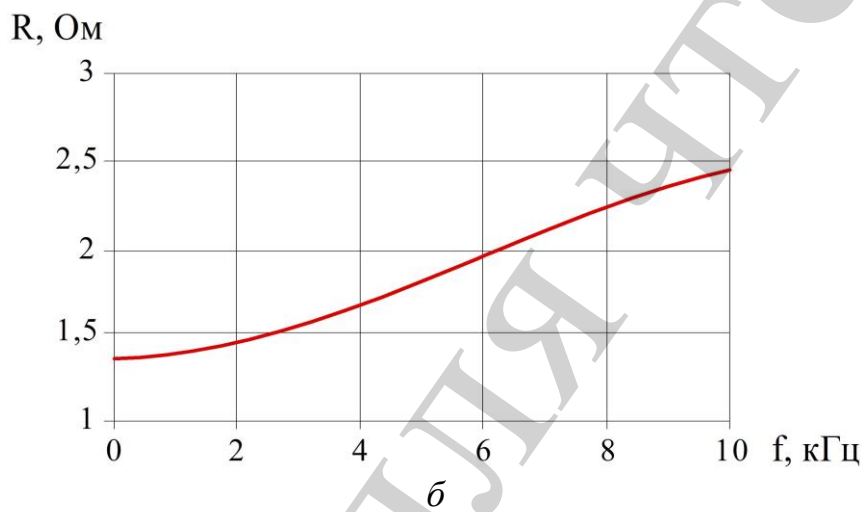
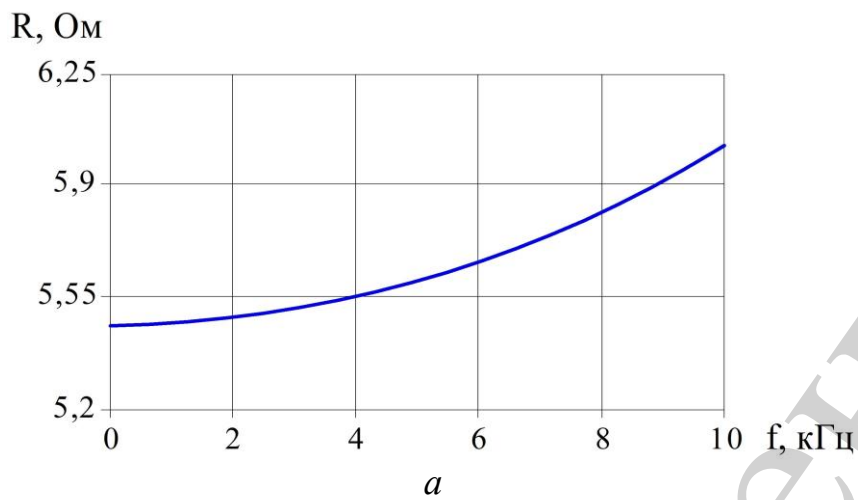


Рис. 4. Залежність активних опорів мідних проводів довжиною 10 км з радіусами 1, 2, 4 мм від частоти: *a* – 1 мм; *б* – 2 мм; *в* – 4 мм

Перевагою запропонованого методу розрахунку опору є збіжність значення опору при частоті близькій нулю до опору постійному струму:



$$Z(f = 0) = R_{DC} = \frac{L}{\gamma \cdot S}. \quad (17)$$

В результаті перетворення отриманих на рис. 4 залежностей опорів від частоти у відносні величини, отримано графіки залежності опорів у відносних величинах (рис. 5).

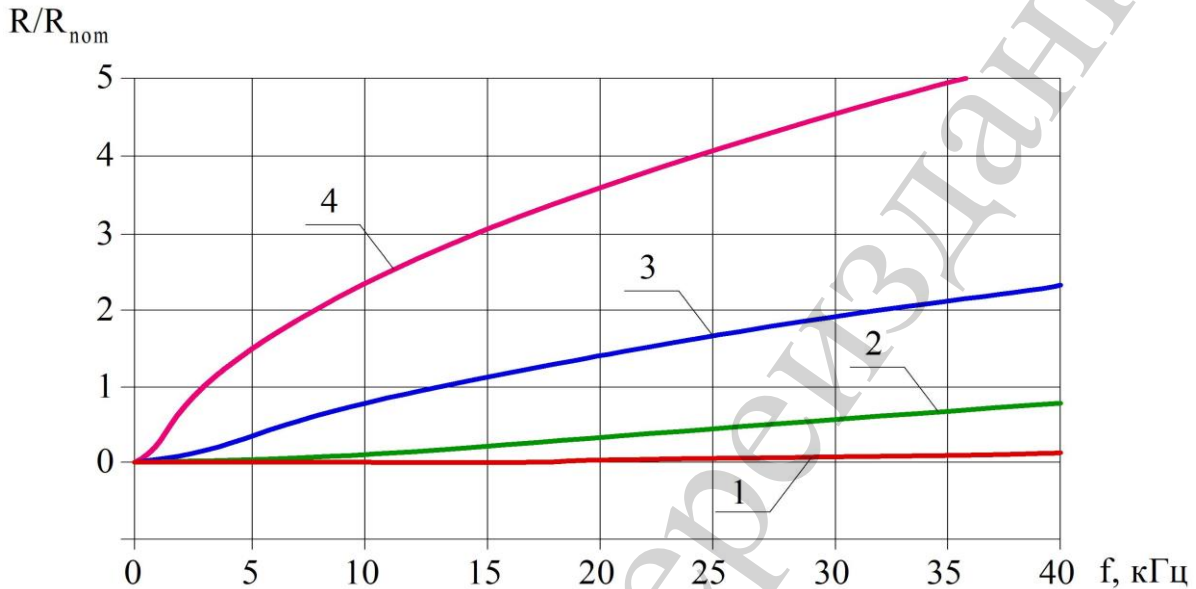


Рис. 5. Залежності відносних активних опорів мідних проводів з радіусами 1, 2, 4 мм від частоти: 1 – 0,5 мм; 2 – 1 мм; 3 – 2 мм; 4 – 4 мм

Як видно з рис. 5, діаметр жили проводу в значній мірі впливає на ефект витіснення струму і, як результат, на значення активного опору на заданій частоті.

Скін-ефект робить активний опір мережі частотно-залежним і опір мережі зростає з ростом частоти, що викликає збільшення втрат потужності системі електропостачання. З приведених характеристик видно, що при тій же частоті вищої гармоніки чим більше радіус провідника, тим більше будуть зростати втрати потужності. Таким чином, врахування втрат потужності від вищих гармонік під дією скін-ефекту особливо важливо для одножильних систем електропостачання з великими радіусами дротів, наприклад, для одножильних контактних дротів системи залізничного електропостачання. У той же час застосування багатожильного кабелю усуває негативний вплив скін-ефекту на втрати в провідниках системи електропостачання від вищих гармонік струмів у досить широкому діапазоні частот. Проте навіть при відсутності впливу скін-ефекту вищі гармоніки спричиняють зростання додаткових втрат потужності в провідниках мереж за рахунок збільшення середньоквадратичного значення струму, що описано у наступному розділі.

## 5. Визначення додаткових втрат потужності в електричній мережі у функції коефіцієнту гармонічних спотворень струму навантаження

Запропоновано метод визначення додаткових теплових втрат в електричних мережах постійного та змінного струму від вищих гармонік, які однозначно визначаються виходячи з результуючого значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму мережі. Даний метод може бути використаний у випадку, коли вплив скін-ефекту на опір мережі з обмеженим спектром вищих гармонік струму є несуттєвим. У цьому випадку додаткові втрати в електричних мережах постійного та змінного струму від вищих гармонік можна розрахувати, виходячи зі значення середньоквадратичного значення (RMS) струму, а, отже, і збільшення втрат в квадратичній залежності від величини RMS значення струму.

Як відомо, коефіцієнти гармонічних спотворень за постійним  $THD_{DC}$  і змінним  $THD_{AC}$  струмах визначаються як:

$$THD_{DC} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{m=\infty} I_m^2}}{I_{DC}}; \quad (18)$$

$$THD_{AC} = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2}}{I_1}, \quad (19)$$

де  $I_m$  – середньоквадратичне значення  $m$ -ої гармоніки;  $I_{DC}$  – значення постійної складової.

Для подальших формул значення THD приведено у відносних величинах, тобто від 0 до 1.

Як відомо, діюче (воно ж середньоквадратичне значення – RMS) значення змінного (або постійного пульсуючого) струму дорівнює величині такого постійного струму, який за час, що дорівнює одному періоду змінного струму, зробить таку ж роботу (тепловий або електродинамічний ефект), що і розглянутий змінний струм.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt}. \quad (20)$$

Середньоквадратичне значення змінного струму можна також виразити через спектр вищих гармонік:

$$I_{RMS\_AC} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2}. \quad (21)$$

З виразу (17) можна виразити суму квадратів вищих гармонік:

$$\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2 = (THD_I \cdot I_1)^2. \quad (22)$$

Тоді середньоквадратичне значення постійного та змінного струмів можна представити у вигляді:

$$I_{RMS\_AC} = \sqrt{I_1^2 + (THD_I \cdot I_1)^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + THD_I^2)}; \quad (23)$$

$$I_{RMS\_DC} = I_{DC} \cdot \sqrt{(1 + THD_{DC}^2)}. \quad (24)$$

Залежність середньоквадратичного значення струму від значення THD наведено на рис. 6, на якому за 100 % прийнято RMS значення першої гармоніки струму.

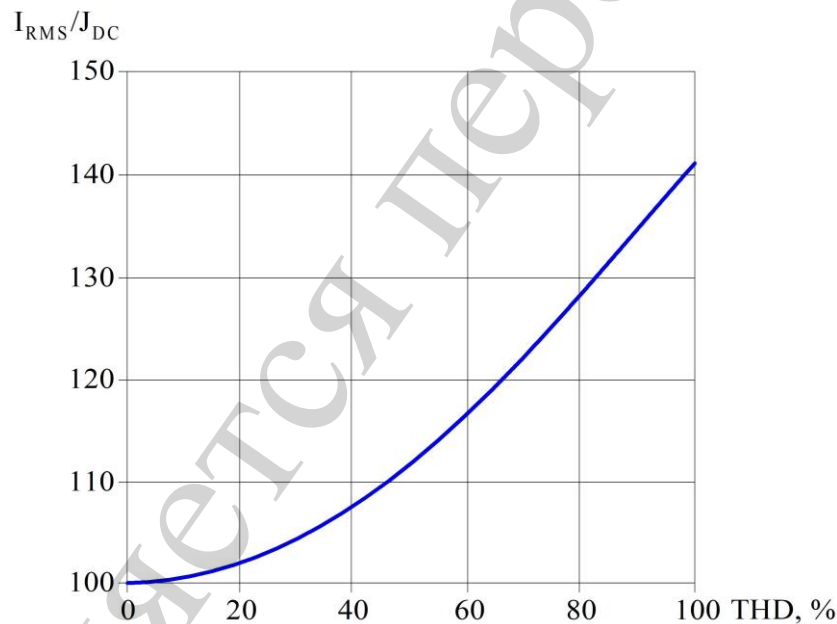


Рис. 6. Залежність відносного значення RMS струму від коефіцієнта гармонічних спотворень

Таким чином, встановлена однозначна залежність між коефіцієнтом гармонічних спотворень споживаного струму та відсотком додаткових втрат потужності.

Залежність відносного значення додаткових втрат від значення коефіцієнта гармонічних спотворень наведено на рис. 7, на якому за 100 % прийнято втрати, викликані основною гармонікою, або для DC мережі постійної складової струму.

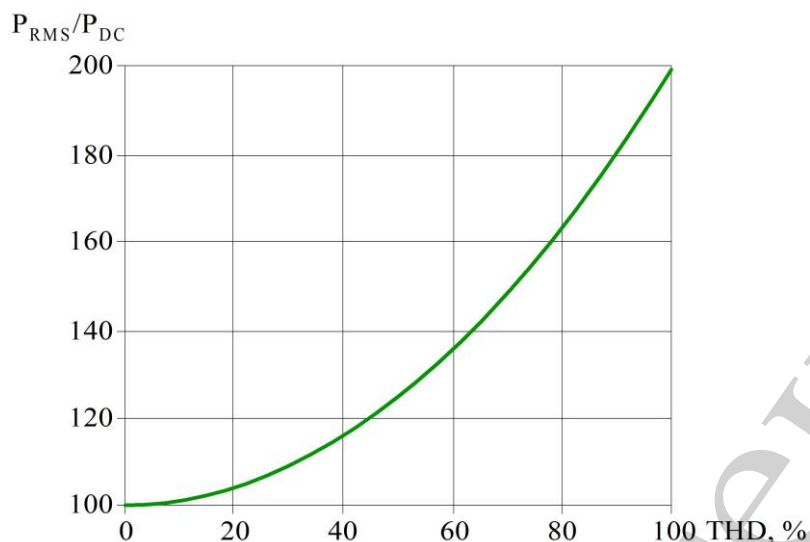


Рис. 7. Залежність процентного значення відносних додаткових втрат від коефіцієнта гармонічних спотворень

Приведені на рис. 7 співвідношення дозволяють визначити додаткові втрати в системі електропостачання від значення коефіцієнту гармонічних спотворень (THD) струму навантаження. З рис. 7 витікає, що спотворення струму мережі з коефіцієнтом гармонічних спотворень 50 % спричиняє збільшення втрат потужності в електричній мережі на приблизно 25 %.

#### **6. Імітаційне моделювання аналізу додаткових втрат в активному опорі електричної мережі від вищих гармонік струмів**

Для підтвердження приведених у попередньому розділі залежностей у середовищі імітаційного моделювання було проведено дослідження втрат потужності в опорі електричної мережі від вищих гармонік трифазного діодного випрямляча та зниження втрат при підключенні силового активного фільтру (САФ). Імітаційну модель приведено на рис. 8.

Параметри імітаційної моделі: напруга живлення мережі –  $3 \times 380$  В; активний опір мережі 0,2 Ом, індуктивність мережі 50 мкГн, індуктивність дроселів САФ – 5 мГн; індуктивність вхідного дроселя діодного випрямляча – 0,1 мГн; ємність фільтру випрямляча 12 мФ; опір у навантаженні випрямляча – 3 Ом. Максимальна відносна похибка розрахунків системи Matlab 0,1 %.

Система керування силового активного фільтру побудована за принципом гістерезисної модуляції та  $rqr$ -теорії потужності. САФ працює в режимі протифазної генерації вищих гармонік струму навантаження. Це забезпечує взаємну компенсацію вищих гармонік струму навантаження струмом САФ, що дозволяє забезпечити THD струму мережі нижче 3 %. Більш детально принципи  $rqr$ -теорії потужності та опис системи керування і електричні процеси в силовому активному фільтрі приведені в [18–22].

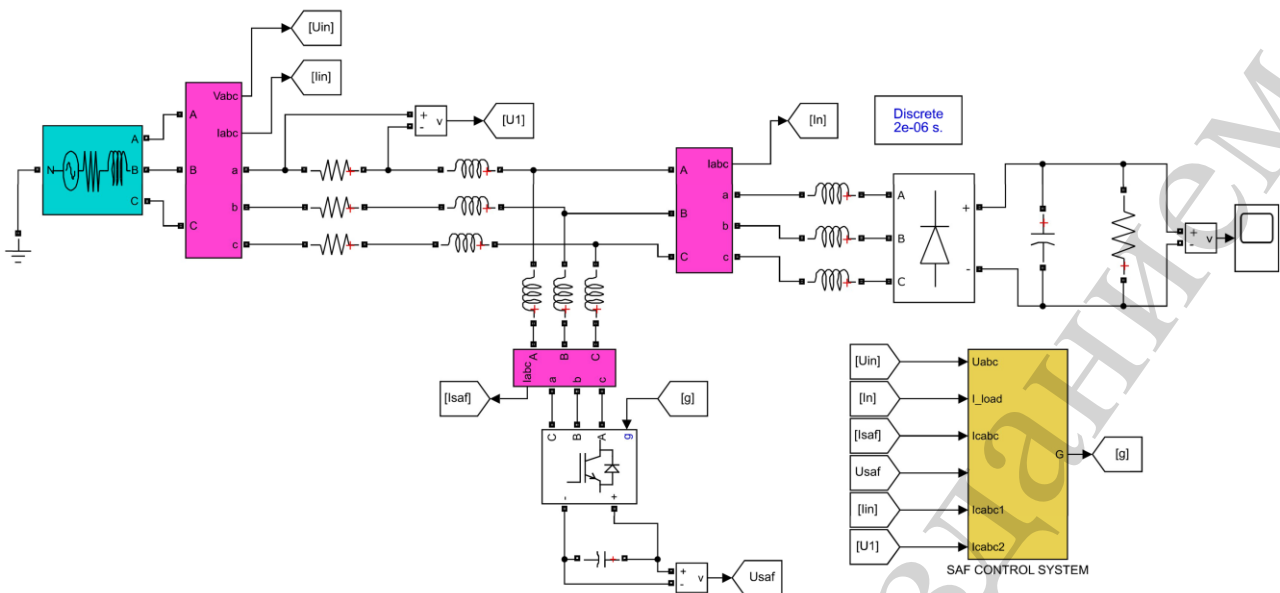


Рис. 8. Імітаційна модель електричної мережі з трифазним діодним випрямлячем та силовим активним фільтром

Результати імітаційного моделювання, а саме вхідний струм діодного випрямляча, струм генерований САФ та результуючий струм у мережі, приведено на рис. 9.

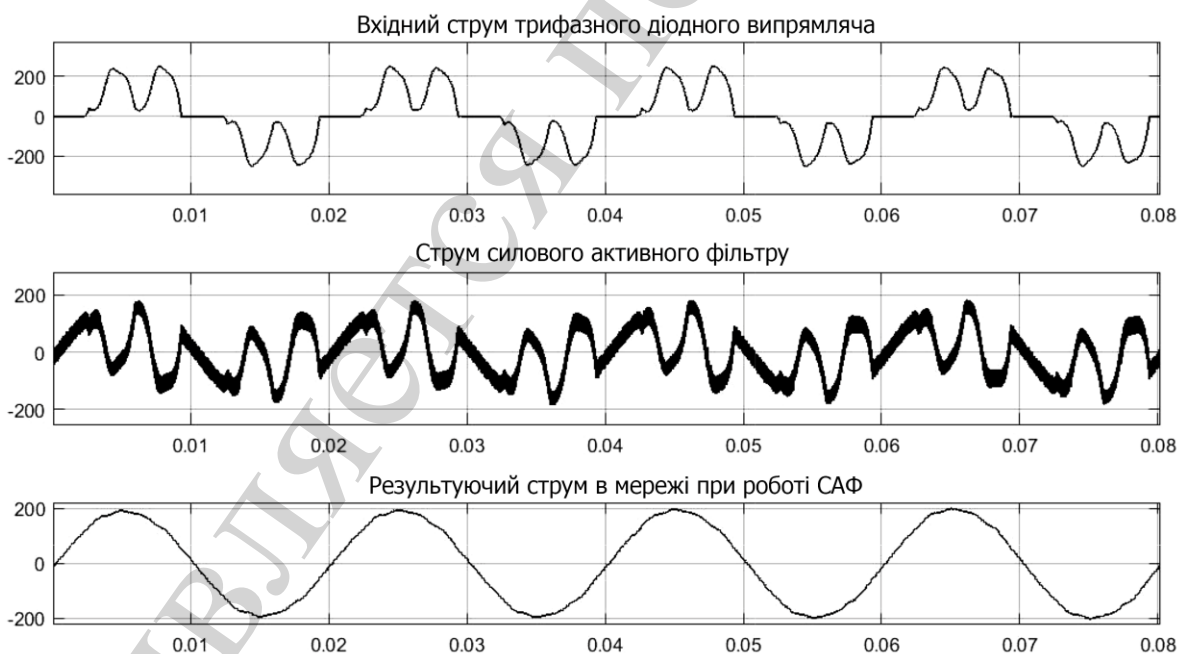


Рис. 9. Осцилограми, отримані при імітаційному моделюванні: вхідний струм трифазного діодного випрямляча (без застосування САФ), струм генерований САФ, результуючий струм мережі при роботі САФ

Результати Фур'є-аналізу струму мережі без включення САФ та при роботі САФ, виконаного у Matlab, наведено на рис. 10.

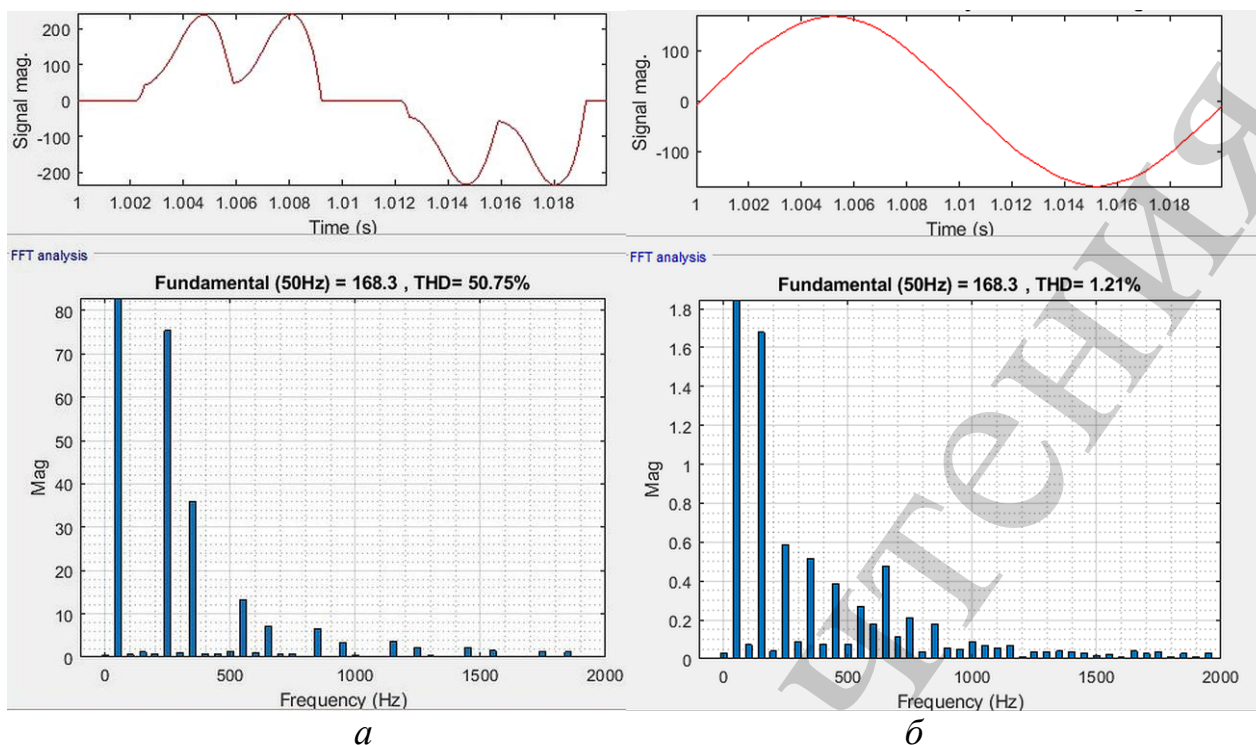


Рис. 10. Результати Фур'є-аналізу в: *a* – вхідного струму діодного випрямляча; *б* – струму мережі при роботі САФ

Чисельні результати імітаційного моделювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2  
Результати імітаційного моделювання

Параметр	Значення до фільтрації	Значення після фільтрації
Перша гармоніка струму мережі, А	119,006	119,006
Коефіцієнт гармонічних спотворень THD струму мережі, %	50,75	1,21
Середньоквадратичне значення струму мережі, А	133,45	119,014
Потужність втрат в активному опорі мережі, зумовлена першою гармонікою струму, кВт	2,8324	2,8324
Загальна потужність втрат в активному опорі мережі, кВт	3,5617	2,8332

З результатів моделювання видно, що застосування силового активного фільтру дозволяє значно знизити вміст вищих гармонік в мережі, знизити середньоквадратичне значення струму мережі, а, відповідно, і втрати в активному опорі електричної мережі. Моделювання показало, що використання силового активного фільтру дозволяє знизити втрати в активному опорі мережі

від конкретного споживача з 3,56 кВт до 2,83 кВт, що співпадає з аналітичними співвідношеннями, наведеними на рис. 7.

## **7. Обговорення результатів дослідження аналітичних співвідношень**

Збільшення втрат потужності в активному опорі мережі від вищих гармонік струмів навантаження визначається як сума втрат потужності від кожної гармоніки. Під дією скін-ефекту зі зростанням частоти вищих гармонік відбувається зростання активного опору мережі. Існуючі співвідношення, які визначають значення активного опору від частоти вищих гармонік, є взаємовиключними. Крім того, для діапазону низьких частот дані вирази є помилковими, бо вони визначають значення активного опору мережі для струму з частотою 50 Гц та для гармоніки 150 Гц значно менше, ніж для постійного струму.

В даній роботі отримані аналітичні залежності активного опору дротів електричної мережі від частоти гармонічного спектру струму навантаження. Особливістю роботи є використання в розрахунках електричного опору мережі рівнянь Бесселя. Перевагою запропонованих рівнянь, у порівнянні з відомими рівняннями, є врахування геометричних параметрів електричних провідників (довжина та радіус), які значно впливають на інтенсивність скін-ефекту та зміну активного опору. Показано, що вплив скін-ефекту на втрати потужності має велике значення при використанні одножильних проводів з великим діаметром, як, наприклад, у контактній мережі на залізничному транспорті. У разі використанні багатожильних дротів з малим радіусом при обмеженому спектрі вищих гармонік до десятка кГц вплив скін-ефекту суттєво зменшується, проте у цьому разі треба додатково враховувати ефект близькості (proximity effect), визначення впливу якого є важливим для подальших досліджень. У розвитку цього дослідження необхідно провести фізичні досліди, які підтвердять приведені вирази впливу скін-ефекту на активний опір. Ускладнює процес підтвердження те, що для проведення такі засоби імітаційного моделювання, як Matlab, Multisim, MicroCAP, P-Spice та інші, не враховують зміну опору електричної мережі від частот вищих гармонік струмів під дією скін-ефекту.

У випадку, коли спектр вищих гармонік є обмеженим і збільшення активного опору мережі у цьому діапазоні частот зростає несуттєво, впливом скін-ефекту можна знехтувати. В цьому разі вплив вищих гармонік струму навантаження на втрати потужності в електричній мережі можна визначити, виходячи зі середньоквадратичного значення струму навантаження. В роботі дані аналітичні залежності відносного збільшення втрат потужності від коефіцієнту гармонічних спотворень струму мережі. Представлені залежності підтверджені імітаційним моделювання в середовищі Matlab на прикладі роботи системи трифазного електропостачання з діодним випрямлячем та силовим активним фільтром.

Практичне застосування цього дослідження може бути знайдено при:

– проведенні розрахунків втрат потужності в системах електропостачання змінного та постійного струму;



– проведенні розрахунків втрат потужності в електричній мережі від конкретного споживача, як фактор техніко-економічного обґрунтування застосування силових активних фільтрів та інших фільтрокомпенсуючих пристроїв, які призначені для зниження вмісту вищих гармонік.

## 8. Висновки

1. Визначено співвідношення залежності активного опору мережі у функції частот вищих гармонік та геометричних характеристик провідників (довжини і діаметру). Встановлено ряд залежностей активного опору проводів з різними радіусами від частоти вищих гармонік (рис. 5) Так, наприклад, показано, що при радіусі проводу 4 мм для гармоніки струму з частотою 8 кГц зростання активного опору мережі відносно опору постійному струму збільшується практично на 100 %, що відповідно викликає пропорційне зростання втрат потужності від цієї гармоніки.

2. Встановлено залежність додаткових втрат потужності в активному опорі мережі від вищих гармонік у функції від коефіцієнта гармонічних спотворень струму навантаження. Показано, що в діапазоні значення THD вхідного струму від 30 % до 80 % додаткові втрати в електричній мережі відповідно зростуть від 10 % до 48 % відносно електричного опору провідника постійному струму.

3. Проведене імітаційне моделювання підтвердило зменшення втрат в активному опорі електричної мережі при зниженні складу вищих гармонік на прикладі електричної мережі з трифазним діодним випрямлячем та силовим активним фільтром. Моделювання підтвердило, що THD вхідного струму діодного випрямляча 50,75 % зумовлювало 25,78 % додаткових втрат в активному опорі електричної мережі.

## Література

1. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гладка А. В. Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом застосування 4QS-випрямлячів // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 178. С. 21–28. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138906>

2. Плахтій А. А., Нерубацький В. П., Силантьєв А. С. Аналіз енергоефективності активного випрямителя с улучшенной гистерезисной системой управления // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2017. № 3. С. 10–16.

3. Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным включением автономных инверторов / Плахтій А. А., Нерубацький В. П., Кавун В. Е., Машура А. В. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2018. № 27. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>

4. Solsona F. J. A., Carrera A. P. Study of harmonics thermal effect in conductors produced by skin effect // IEEE Latin America Transactions. 2014. Vol. 12, Issue 8. P. 1488–1495. doi: <https://doi.org/10.1109/tla.2014.7014518>



5. Tsuchiya A., Onodera H. Effect of Anomalous Skin Effect on Transmission-Line Loss // Leice Technical Report Microwaves. 2011. Issue 111. P. 77–81.

6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.

7. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage // 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/optim.2015.7426958>

8. Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12. С. 27–31.

9. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / Люতারевич А. Г., Вырва А. А., Долингер С. Ю., Осипов Д. С., Четверик И. Н. // Омский научный вестник. 2009. № 1. С. 109–113.

10. Боровиков В. С., Харлов Н. Н., Акимжанов Т. Б. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 322, № 4. С. 91–93.

11. Development of calculation methods for additional electrical power losses during transportation / Akimzhanov T. B., Kharlov N. N., Borovikov V. S., Ushakov V. Y. // 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST). 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ifost.2014.6991138>

12. Improvement of compensation method for non-active current components at mains supply voltage unbalance / Al-Mashakbeh A. S., Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1, Issue 8 (85). P. 41–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.87316>

13. Жежеленко И. В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения // Электрика. 2010. № 4. С. 3–6.

14. Beaty H. W. Standard Handbook for Electrical Engineers. 14th ed. McGraw-Hill, 2000. P. 34–50.

15. Hayt W. H., Buck J. A. Engineering Electromagnetics. Graw Hill, 2006. 561 p.

16. Ben C. J. The Practical Issues involved in Designing, Specifying and Installing Skin Effect Current Tracing Systems // IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE). 2012. P. 1–13.

17. Zaikin D. I. Round and tubular wire skin effect modeling and usage SPICE as Maxwell's equations solver // 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/telfor.2015.7377551>
18. Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations / Dias R. A., Lira G. R. S., Costa E. G., Ferreira R. S., Andrade A. F. // 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/sbse.2018.8395687>
19. Czarnecki L. S. On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory // IEEE Transactions on Power Electronics. 2004. Vol. 19, Issue 3. P. 828–836. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2004.826500>
20. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory / Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi J. // IEEE Transactions on Power Electronics. 2002. Vol. 17, Issue 5. P. 701–710. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2002.802185>
21. Jin T., Wen J., Smedley K. Control and topologies for three-phase three-level active power filters // Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/apec.2005.1453017>
22. Maliakova M., Kalinov A. APF control with the use of the direction of the energy flow determination method in the electric circuit with a nonlinear load // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248894>