

УДК 621.3.013.001.2

Д.П. Гречин

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

АНАЛІЗ БІЖУЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ У ПРОВІДНІЙ ФЕРОМАГНІТНІЙ ПЛИТІ ПРИ ОДНОСТОРОННІХ ЗБУДЖЕННЯХ

© Гречин Д.П., 2001

Проаналізовано результати розрахунку неусталених та усталених електромагнітних полів у нескінченній провідній феромагнітній плиті, зумовлених гармонічними біжучими вздовж однієї поверхні плити лінійними густинами струмів при різних швидкостях і амплітудах струмових шарів, без врахування та з урахуванням насичення феромагнетика. Наведено розподіли електромагнітних полів по товщині плити. Показано, що амплітуди зумовлених насиченням вищих просторових гармонічних змінних є сумірними з амплітудами їх основних гармонік.

The simulation outcomes of the unsteady and steady electromagnetic fields in infinite conducting ferromagnetic plate, excited by sinusoidal running along one surface with different velocities and amplitudes of specific electric loading, without and with taking into account the ferromagnetic saturation, have been analyzed. The electromagnetic field distributions are given and have been shown, that the amplitudes of a higher space harmonic variable, caused by saturation, are comparable with amplitudes of their basic harmonics.

Математичне моделювання нестационарних електромагнітних полів у провідних феромагнітних елементах конструкцій електромеханічних перетворювачів енергії має практичне застосування до аналізу перехідних процесів в електричних машинах з суцільними феромагнітними роторами, індукційного нагрівання, неруйнівного контролю тощо.

Математична модель нестационарного електромагнітного поля у феромагнітній плиті*, дозволяє розрахувати перехідні та усталені електромагнітні процеси в нескінченній однорідній провідній ізотропній плиті, зумовлені розташованими на її поверхнях лінійними густинами струмів. Ці густини є періодичними вздовж однієї з координат у площині поверхні плити і змінюються в часі за довільними заданими законами.

У цій статті розглянуті розраховані за згаданою вище математичною моделлю перехідні та усталені електромагнітні процеси в нескінченній плиті, зумовлені гармонічними біжучими вздовж однієї поверхні плити лінійними густинами струмів (рис. 1). При цьому електромагнітне поле в плиті є двовимірним: вектор \mathbf{A} магнітного потенціалу і вектор \mathbf{J} густини струму мають тільки складову вздовж осі Oz , паралельну до збуджуючих струмів, а вектор \mathbf{B} магнітної індукції і вектор \mathbf{H} напруженості магнітного поля – тільки складові B_x, B_y, H_x, H_y у площині поперечного перерізу плити. Предметом дослідження є

*1. Filc R., Stefaniak Z., Hreczyn D. Modelowanie matematyczne niestacjonarnego pola elektromagnetycznego w płycie ferromagnetycznej // Prace XXIII Międzynarodowej Konferencji z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC – SPETO 2000. – Gliwice – Ustron, 2000. – S. 67–72.

аналіз впливу нелінійності характеристики намагнічування матеріалу плити на електромагнітні процеси при різних амплітудах збуджуючого струму та різних швидкостях його переміщення.

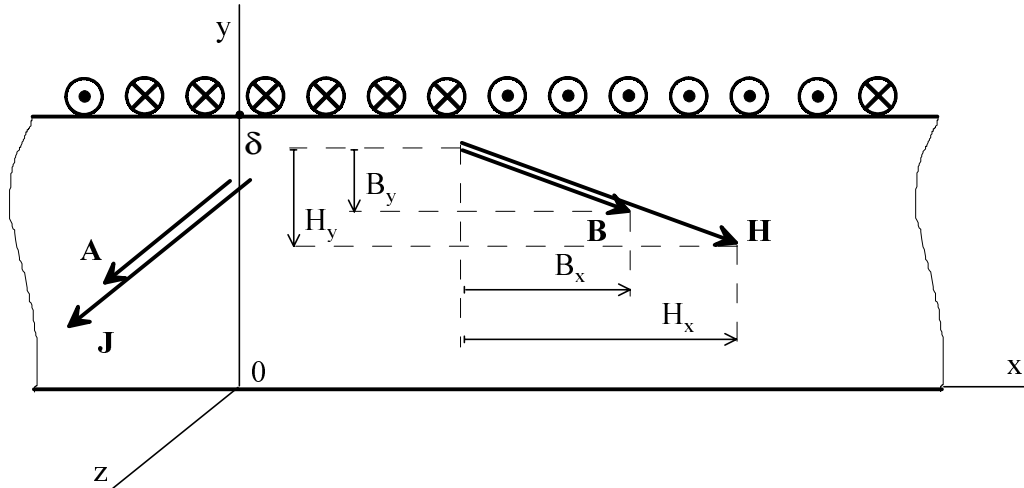


Рис. 1. Нескінченна однорідна провідна ізотропна плита

Електромагнітне поле в плиті за вказаних умов задовольняє рівняння Максвелла

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}; \quad B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x},$$

де γ – питома електрична провідність матеріалу плити. Вектори \mathbf{H} і \mathbf{B} зв'язані магнітною характеристикою $\mathbf{H}=\mathbf{H}(\mathbf{B})$ феромагнетика, рівнозначною сукупності скалярних функцій

$$B_x = B_x(H_x, H_y); \quad B_y = B_y(H_x, H_y),$$

а граничні умови мають вигляд:

на нижній поверхні плити (при $y = 0$)

$$H_x(x, t) = 0;$$

на верхній поверхні плити (при $y = \delta$)

$$H_x(x, t) = Q \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{\tau}\right),$$

де δ – товщина плити; Q – амплітуда лінійної густини струму; f – частота; τ – просторовий період зміни густини струму вздовж осі $0x$.

Вхідні дані до розрахунків приймалися такими: $\delta = 0,03$ м; $\tau = 0,10$ м; $\gamma = 0,35 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м), характеристика намагнічування матеріалу плити відповідала сталі роторних поковок для турбогенераторів до 25 МВт, а Q та f – задавались різними.

Розподіли поля будемо зображати за допомогою силових ліній вектора \mathbf{B} , чи, що те ж саме, ліній рівня векторного магнітного потенціалу. На рис. 2, 3 і 4 показані електромагнітні поля в поперечному перерізі плити на періоді τ при $f = 5$ Гц і трьох різних значеннях амплітуд лінійної густини струму для моментів часу 0,01, 0,04, 0,07 с після початків перехідних процесів та 1 с, що відповідає їх закінченню.

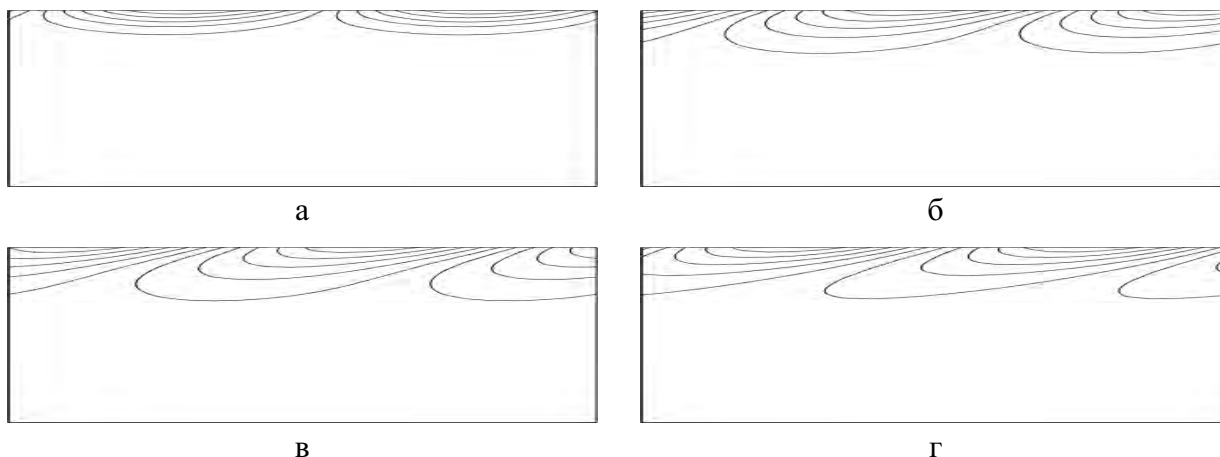


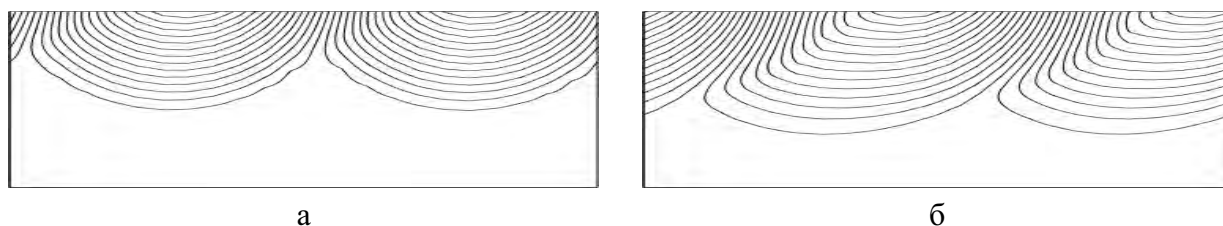
Рис. 2. Розподіли електромагнітних полів при $f = 5 \text{ Гц}$ і $Q = 0,15 \cdot 10^6 \text{ А/м}$:
 $a - t = 0,01 \text{ с}$; $б - t = 0,04 \text{ с}$; $в - t = 0,07 \text{ с}$; $г - t = 1 \text{ с}$

Розподіли полів, зображені на рис. 2, розраховані при амплітуді $Q = 0,15 \cdot 10^6 \text{ А/м}$. Внаслідок дії наведених струмів поля витісняються до порівняно тонкого приповерхневого шару, тоді як у значній частині перерізу плити вони практично відсутні. Крім цього, поля “затягуються” у напрямку, протилежному до переміщення струму. Таку деформацію полів можна інтерпретувати як “утримання” поля провідним середовищем і вона є безпосереднім наслідком правила Ленца стосовно до даної електродинамічної задачі. При прийнятій амплітуді густини струму нелінійність характеристики намагнічування матеріалу плити практично не впливає на розподіли полів, оскільки значення магнітної індукції у приповерхневому шарі не перевищує 1 Тл і швидко зменшується у міру проникнення поля вглиб плити.

На рис. 3 зображені розподіли полів, розраховані при амплітуді $Q = 0,15 \cdot 10^7 \text{ А/м}$. Таке збільшення густини струму призводить до значного насичення приповерхневого шару – значення індукції тут досягає 2 Тл . Внаслідок цього електромагнітне поле більше проникає вглиб плити, що зумовлено взаємодією витіснення струму та нелінійності характеристики намагнічування матеріалу плити. При цьому максимум індукції утримується майже незмінним у порівняно грубому приповерхневому шарі. Так, на $2/5$ товщини плити від її поверхні значення магнітної індукції все ще залишається значним – понад $1,5 \text{ Тл}$. У частині плити, що знаходиться нижче цього приповерхневого шару, інтенсивність поля невелика і в міру заглиблення у плиту швидко зменшується.

При подальшому збільшенні лінійної густини струму на поверхні електромагнітне поле проникає в плиту все глибше. Це добре видно з рис. 4, на якому зображені розподіли полів, розраховані при амплітуді $Q = 0,30 \cdot 10^7 \text{ А/м}$. Інтенсивність поля при

такій густині струму велика по всій товщині плити – у нижній її частині значення індукції досягає $1,7 \text{ Тл}$.



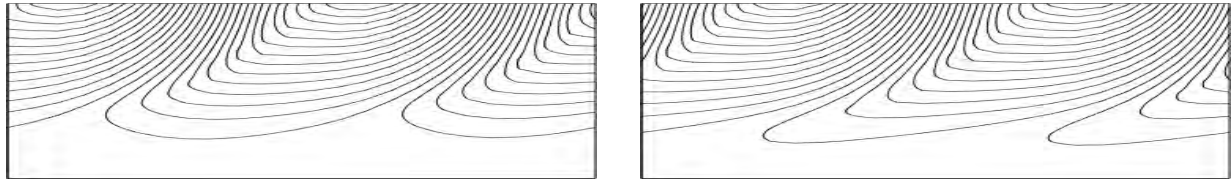


Рис. 3. Розподіли електромагнітних полів при $f = 5$ Гц і $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м:
 $a - t = 0,01$ с; $б - t = 0,04$ с; $в - t = 0,07$ с; $г - t = 1$ с

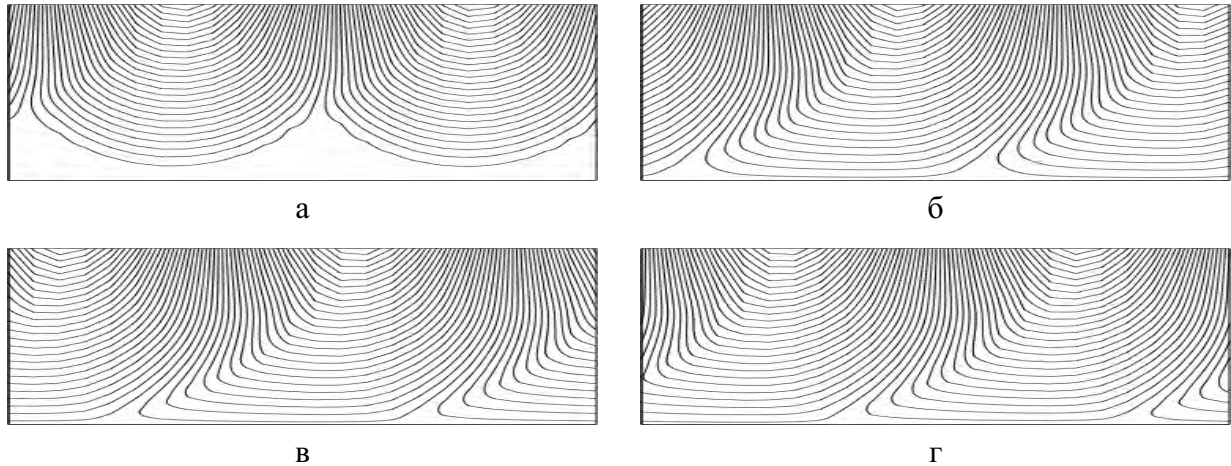


Рис. 4. Розподіли електромагнітних полів при $f = 5$ Гц і $Q = 0,30 \cdot 10^7$ А/м:
 $a - t = 0,01$ с; $б - t = 0,04$ с; $в - t = 0,07$ с; $г - t = 1$ с

Насичення матеріалу плити суттєво впливає на характер її перемагнічування. На рис. 5, 6 показані розподіли складових $V_x(x)$, $V_y(x)$ вектора магнітної індукції вздовж періоду на різних глибинах, розраховані при двох значеннях амплітуди лінійної густини струму: $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м, що відповідає ненасиченому стану феромагнетика, та $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м, що відповідає його насиченому стану. Як видно з рис. 5, при ненасиченому стані складові V_x , V_y на різних глибинах плити розподілені вздовж періоду за синусоїдним законом. При насиченні матеріалу плити, як видно з рис. 6, цей розподіл несинусоїдний, а амплітуди зумовлених насиченням вищих просторових гармонічних змінних є сумірними з амплітудами їх основних гармонік.

На рис. 7 зображені розподіли електромагнітних полів, розраховані при $f = 1$ Гц і амплітудах густини струму $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м та $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м. Ці поля характеризують усталені режими, отримані після закінчення відповідних перехідних процесів. З порівняння усталених полів, розрахованих при амплітудах $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м та двох частотах: $f = 1$ Гц і $f = 5$ Гц (відповідно рис. 7, а і рис. 2, з) й при $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м та $f = 1$ Гц і $f = 5$ Гц (відповідно рис. 7, б і рис. 3, з) видно, що зі збільшенням частоти поле все більше витісняється до поверхні плити. Підтвердженням цьому служать розподіли полів, розраховані при $f = 20$ Гц і амплітудах лінійних густин струму $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м та $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м, зображені на рис. 8.

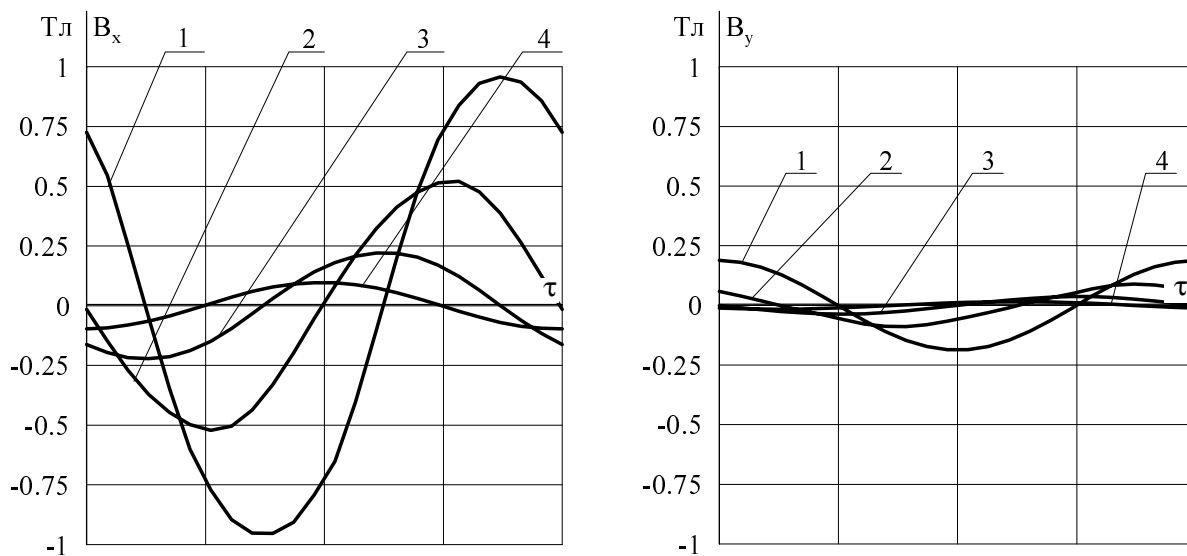


Рис. 5. Розподіли $B_x(x)$, $B_y(x)$ при $f = 5$ Гц і $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м
на різних глибинах плити від її поверхні:

1 – на поверхні плити; 2 – на глибині 1/10 від товщини плити;
3 – на глибині 2/10 від товщини плити; 4 – на глибині 3/10 від товщини плити

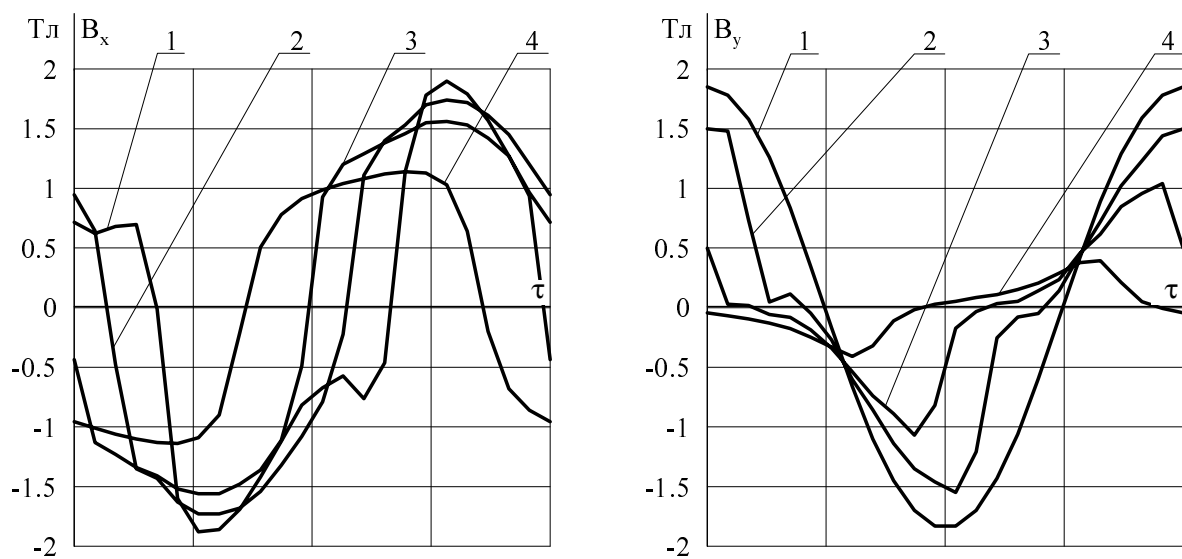
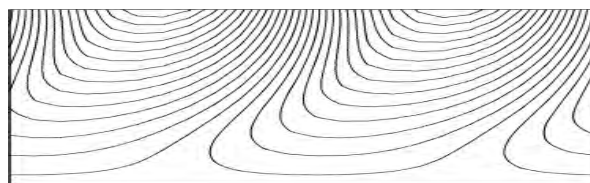


Рис. 6. Розподіли $B_x(x)$, $B_y(x)$ при $f = 5$ Гц і $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м
на різних глибинах плити від її поверхні:

1 – на поверхні плити; 2 – на глибині 1/5 від товщини плити;
3 – на глибині 2/5 від товщини плити; 4 – на глибині 3/5 від товщини плити



а



б

Рис. 7. Розподіли електромагнітних полів при $f = 1$ Гц:
а – $Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м; б – $Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м

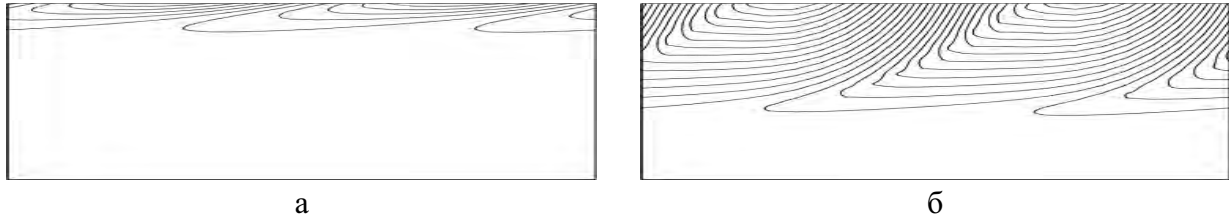


Рис. 8. Розподіли електромагнітних полів при $f = 20$ Гц.
 $a - Q = 0,15 \cdot 10^6$ А/м; $б - Q = 0,15 \cdot 10^7$ А/м

Висновки. Насичення матеріалу плити суттєво впливає на характер її переманіччування: амплітуди зумовлених насиченням вищих просторових гармонічних змінних є сумірними з амплітудами їх основних гармонік.

УДК 621.316: 621.311.153

Л. Давиденко, Т. Коменда, І. Ткаченко
 Луцький державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

© Давиденко Л., Коменда Т., Ткаченко І., 2001

Розглянуті питання ефективності управління енерговикористанням промислових підприємств. Запропонована спрощена формалізація математичної моделі управління енерговикористанням. Наведені способи оцінки адекватності моделі.

In the message shown questions of effective leading of the industrial plants energy consumption. Given simple formalization of the mathematical model, which subscribe leading of the industrial plants energy consumption. Although in message given methods of the estimation of adequacy of the mathematical model.

Управління енерговикористанням покликане забезпечити оптимальність параметрів процесу споживання і передачі електричної енергії, зумовлює збільшення раціоналізації енерговикористання, зменшення непотрібних витрат і втрат енергії, знижує енергоємність продукції і її собівартість.

Згідно з [1] значною проблемою енергетики є втрати енергії, обсяги яких за останні роки постійно збільшуються. У відповідності з [6]: М.Ковалко (народний депутат України) засвідчив, що існує тільки один шлях підвищення ефективності народного господарства – зниження його енергоємності. Цей шлях наприкінці 60-х років пройшли всі країни західної Європи і досягли хороших результатів. Згідно з інформацією директора Інституту енергозбереження і енергоменеджменту НТУУ КПІ А.В.Праховника [6], за показниками енергоємності ВВП серед країн колишнього СРСР Україна займає передостаннє місце, а один кіловат встановленої потужності в нашій країні в два рази дорожчий, ніж у країнах ЄС.

Згідно з [4] втрати енергії поділяються на технічні і комерційні. Крім значної частини комерційних втрат енергії існує достатньо вагома складова технічних втрат енергії як з боку