# СПІН-ХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА

## №4

Релаксаційні процеси у феритових структурах

## 4.1 Феноменологічний опис згасання магнітостатичних збуджень

- **Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

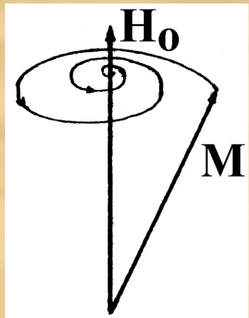
III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

## 4.2. Елементарні процеси, що призводять до релаксації МСХ

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов’язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

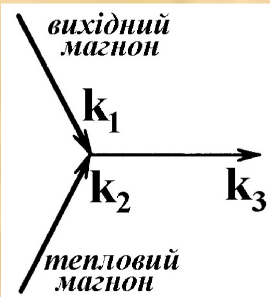
Можемо класифікувати процеси релаксації в феритах:

## 4.2.1. Власні процеси релаксації.

## <u>Магнон-магнонні процеси.</u>

**I. Тримагнонні процеси:**

- **злиття** – два магнони знищуються, один народжується:




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

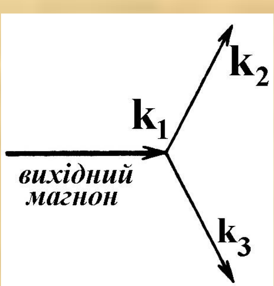
$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

- **розщеплення** –один магнон знищується, два народжуються:




Для опису згасання (релаксації), яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшиця:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У формі Гілберта:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):

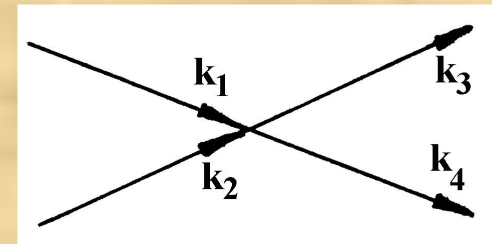
$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови малої дисипації всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна встановити зв'язок:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

# II. Чотиримагнонні процеси:




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

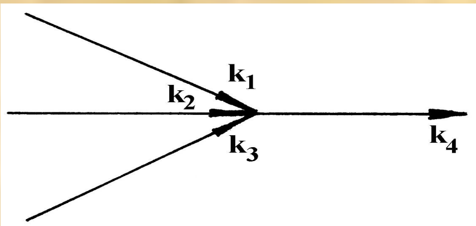
III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$





**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

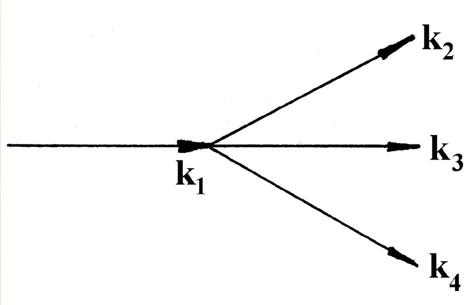
III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$



**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

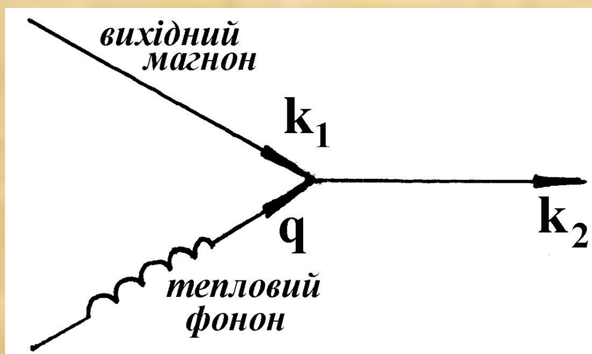
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**III. Багатомагнонні процеси –** більш вірогідні **із підвищенням температури**, коли збільшується кількість теплових магнонів та, як наслідок, - вірогідність їх взаємодій.

## Магнон-фононні процеси.




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha \ll 1$.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

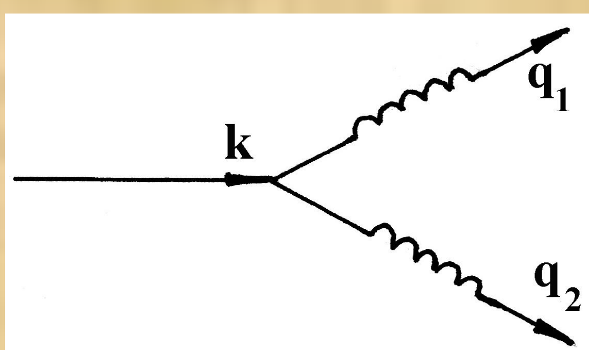
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

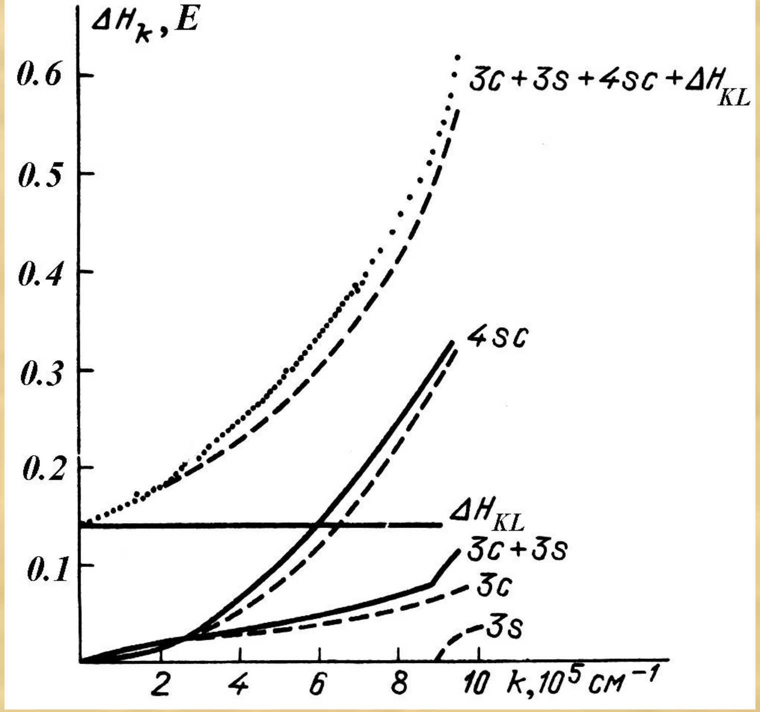
$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$


**II. Одномагнон-однофононний процес –** енергія магнона безпосередньо передається гратці

Для опису згасання (релаксації), яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:
I. У формі Ландау-Ліфшиця:
$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$
$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha \ll 1$.
II. У формі Гілберта:
$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$
III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):
$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.
За умови малої дисипації всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна встановити зв'язок:
$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$



# Експериментальна перевірка




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

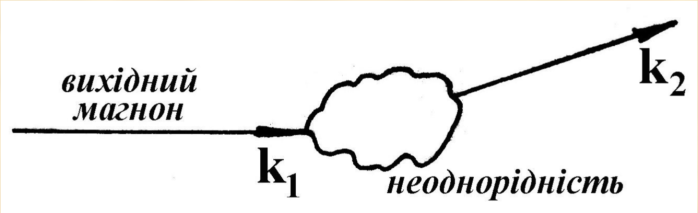
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

## 4.2.2. Невласні процеси релаксації.

## І. Двохмагнонні процеси:




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов´язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

І. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

ІІ. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

ІІІ. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

### Типи неоднорідностей:

- Порушення порядку розташування магнітних іонів у вузлах кристалічної гратки, порушення хімічного складу,
- Порушення постійності напрямків вісей кристалу, полікристалічність,
- Неоднорідні пружні напруження, які спричиняють дислокації,
- “Геометричні неоднорідності” – пори, тріщини, шорсткість поверхні зразків.

Двомагнонний процес розсіювання пояснив **залежність ширини лінії ФМР зразків від стану поверхні.**

## Загальна схема “каналів” втрат енергії МСХ

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов’язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

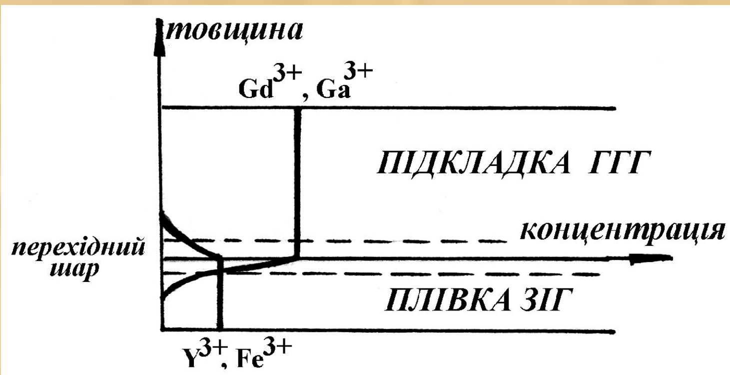
III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$




**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов’язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

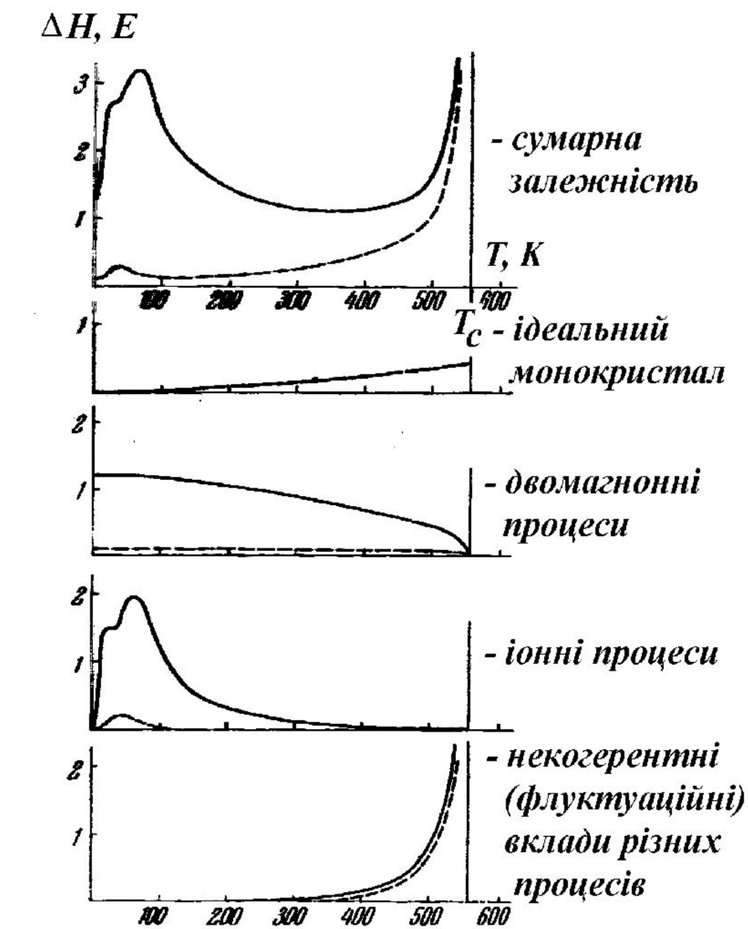
III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$




*суцільні криві - монокристал ЗІГ із звичайним вмістом парамагнітних домішок*

*штрихові криві - монокристал ЗІГ із над чистих реактивів*

**Для опису згасання (релаксаціі),** яке пов´язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial\vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0\vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

**Для опису згасання (релаксації)**, яке пов'язані з рухом вектора намагніченості, використовують **рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:**

I. У **формі Ландау-Ліфшиця**:

$$\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M}[\vec{M} \times [\vec{M} \times \overrightarrow{H_e}]]$$

$\alpha$ - безрозмірний параметр згасання, $\alpha$<<1.

II. У **формі Гілберта**:

$$\vec{R} = -\frac{\alpha}{M}[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}]$$

III. У **формі Блоха** (або **Блоха-Бломбергена**):

$$\vec{R} = \omega_r(\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_o}$ - - статична сприйнятність, $\omega_r$ - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора $\vec{M}$.

За умови **малої дисипації** всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна **встановити зв'язок**:

$$\alpha = \omega_r/\omega_H$$

# Дякую за увагу!