

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:

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

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

II. У формі Гілберта:

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

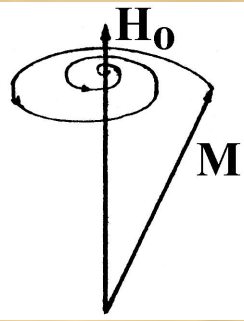
III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):

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

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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:

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

α - 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, ω_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:

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

α - 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, ω_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:

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

α - 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):

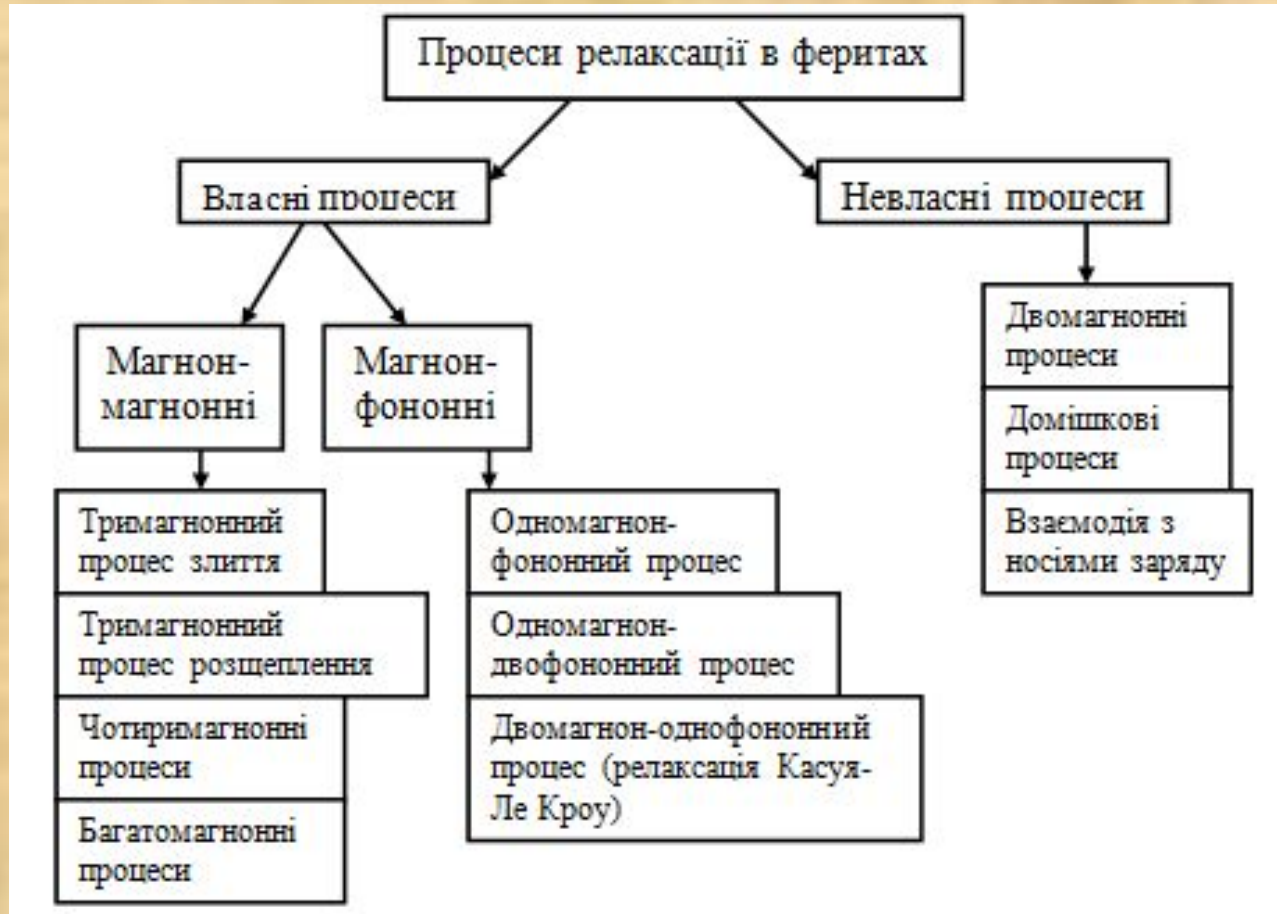
$$\vec{R} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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:

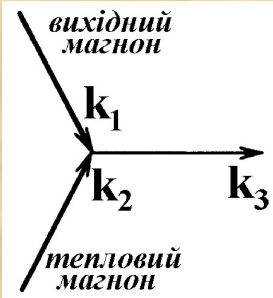


4.2.1. Власні процеси релаксації.

Магнон-магنونні процеси.

I. Тримагنونні процеси:

- злиття – два магنونи 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:

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

α - 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):

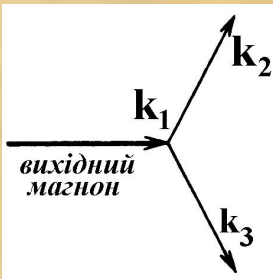
$$\vec{R} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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 магنون 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:

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

α - 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):

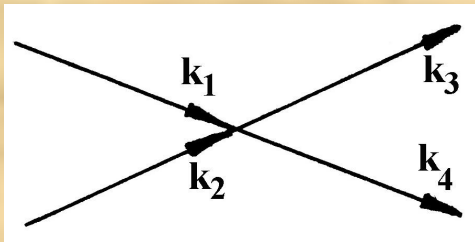
$$\vec{R} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшица з релаксацийним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшица:

$$\dot{\vec{M}} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$$

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

II. У формі Гілберта:

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

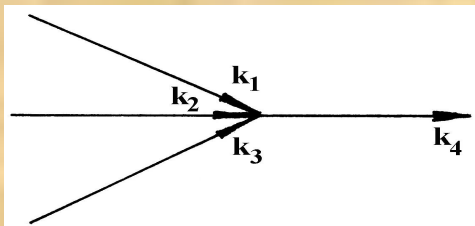
III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):

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

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшица з релаксацийним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшица:

$$\dot{\vec{M}} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$$

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

II. У формі Гілберта:

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

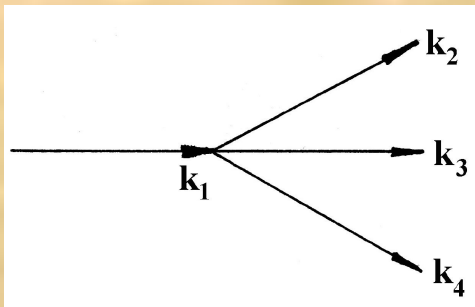
III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):

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

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшица з релаксацийним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшица:

$$\dot{\vec{M}} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$$

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

II. У формі Гілберта:

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

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

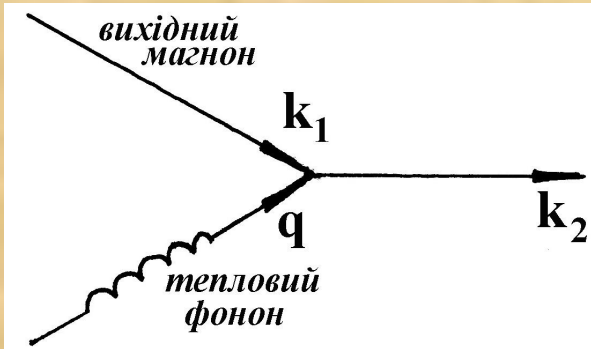
$$\dot{\vec{M}} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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. Багатомагنونні 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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшица з релаксаційним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшица:

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

α - 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):

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

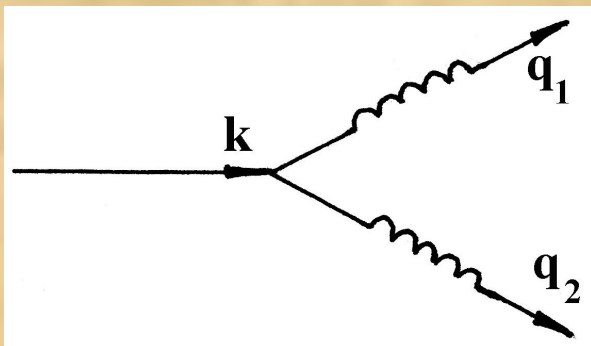
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_r - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора \vec{M} .

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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшица з релаксаційним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшица: $\vec{R} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$

α - 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):

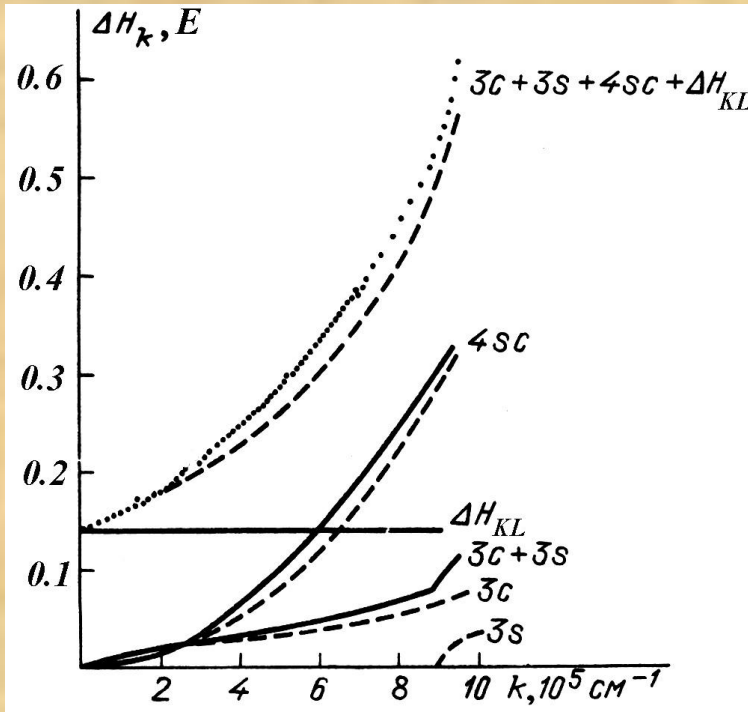
$$\vec{R} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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'язане з рухом вектора намагніченості, використовують рівняння Ландау-Ліфшиця з релаксаційним доданком:

I. У формі Ландау-Ліфшиця:

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

α - 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):

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

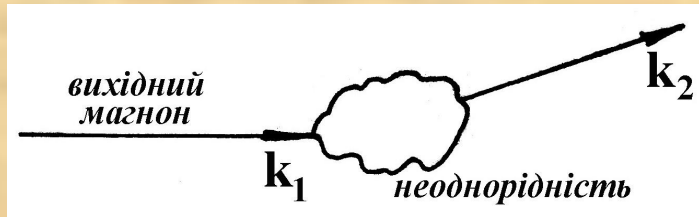
($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_r - частота релаксації) - допускає зміну довжини вектора \vec{M} .

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.

I. Двохмагنونні процеси:



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

I. У формі Ландау-Ліфшица:

$$\dot{\vec{M}} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$$

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

II. У формі Гілберта:

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

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

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

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

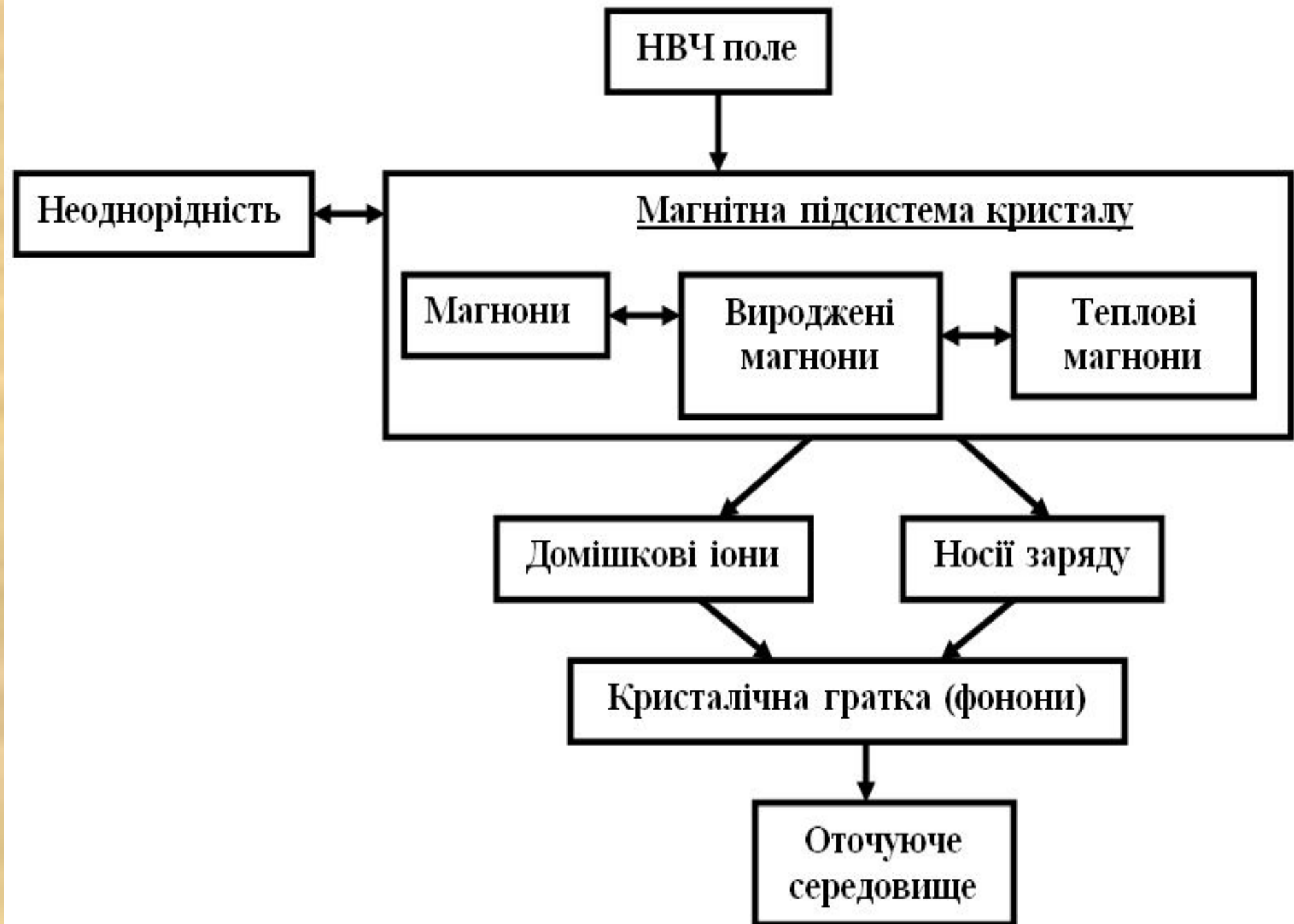
За умови малої дисипації всі три рівняння є еквівалентними та між параметрами релаксації можна встановити зв'язок:

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

Типи неоднорідностей:

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

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

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

II. У формі Гілберта:

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

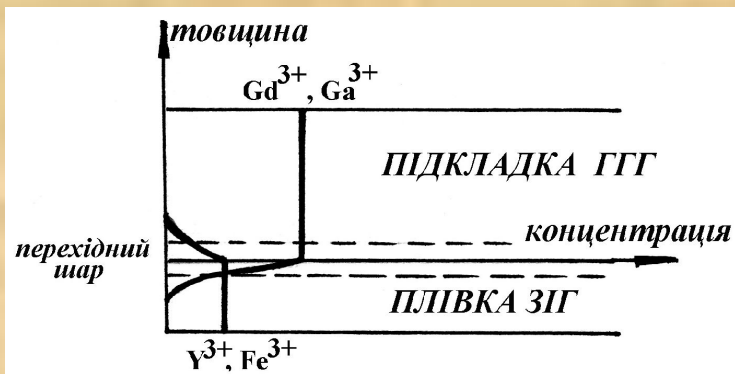
III. У формі Блоха (або Блоха-Бломбергена):

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

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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:

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

α - 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, ω_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:

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

α - 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):

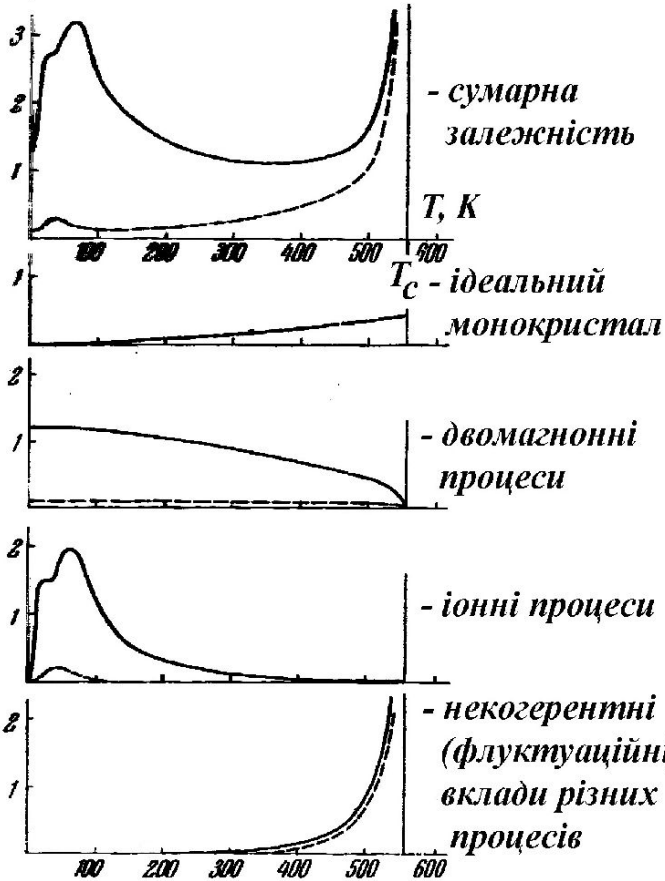
$$\vec{R} = \omega_r (\vec{M} - \chi_0 \vec{H})$$

($\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$ - статична сприйнятність, ω_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:**

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

$\Delta H, E$



суцільні криві - монокристал ЗІГ із звичайним вмістом парамагнітних домішок

штрихові криві - монокристал ЗІГ із над чистих реактивів

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

I. У формі Ландау-Ліфшица:
$$\dot{\vec{M}} = -\frac{\gamma\alpha}{M} [\vec{M} \times [\vec{M} \times \vec{H}_e]]$$

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

II. У формі Гілберта:

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

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

$$\dot{\vec{M}} = \omega_r (\vec{M} \times \vec{H})$$

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

За умови малот 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:

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

α - 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, ω_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:

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

α - 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, ω_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:

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

α - 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, ω_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!

