

**Висновки.** 1. Перегорання запобіжників, через які трансформатор приєднується до мережі, у разі, коли частота коливань вільної складової внутрішніх перенапруг мережі збігається з резонансною частотою трансформатора, може призвести до його пошкодження.

2. Для захисту трансформатора від перенапруг запропоновано встановлення розрядників після запобіжників, безпосередньо на виводах обмотки ВН трансформатора.

3. Як варіант можливо встановлення обмежувачів перенапруг до запобіжника, а вентильних розрядників – після. У такому разі пробивні напруги розрядників повинні бути більшими, ніж залишкові напруги обмежувачів за розрахункового значення імпульсного струму обмежувача напруги.

1. *Никонець Л.О., Бубряк А.Е., Березюк І.М., Іванців Р.Б. Робота внутрішньої ізоляції при аварійних режимах трансформатора напруги НОМ-10 // Новини енергетики. – 2007. – № 7. – С. 32–33.* 2. *Долгинов А.И, Перенапряжения в электрических системах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 512 с.* 3. *Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1969. – 268 с.*

УДК 535.36

Р.А. Пеленський

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ТЗЕ

## ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ НАНОМАГНЕТИЗМУ

Р.А. Пеленський, 2008

**Розглянено питання утворення магнітних полів у наносередовищах. Розкрито механізми утворення і функціонування подвійних шарів магнітних зарядів у приповерхневих шарах наноплівки та їх значення у створенні інформаційної системи наноплівкових структур.**

**Issues of the formation of magnetic fields in the magnetic nanomedia have been examined. Mechanisms of the formation and functioning of the double layers of the magnetic charges in the pre-surface layers of nanofilms as well as their role in the creation of the information system of nanofilms structures have been revealed.**

**Постановка проблеми.** Вивчення виняткових електромагнітних явищ у наноплівкових середовищах є надзвичайно актуальним. Це основа, на якій розбудовується нанонаука, яка повинна відтворювати обертальні властивості матерії, вплив розривів атомних зв'язків на поверхні середовищ на їхні характеристики. Ці збурювачі спітронного континууму є причиною утворення магнітних полів у приповерхневих областях наноплівки.

**Аналіз останніх досліджень.** Сьогодні процеси у вузьких приповерхневих областях розглядаються винятково на основі теорії обмінних взаємодій. Розроблені математичні моделі процесів у доменних стінках є надзвичайно громіздкими. Через це практичне їх застосування в цілях розрахунку конкретних структур є дуже проблематичним.

**Задачі досліджень.** Вивчення можливостей зображення доменних стінок як подвійних шарів магнітних зарядів і дослідження в них різноманітних процесів на основі апарата теорії магнітних кіл, дослідження хвильових процесів у доменних стінках та обґрунтування явища гігантського магнітного опору.

**Виклад основного матеріалу.** Наноплівкові середовища можна розглядати як проміжну ланку між середовищами пристроїв атомної інженерії [1] і мікроелектронними середовищами елементів інтегральних схем. Методи атомної інженерії засновані на принципах побудови пристроїв з окремих атомів і молекул, які підпорядковані законам квантової механіки. До класів таких пристроїв належать атомні моношари, технології створення яких давно відомі і реалізовані на практиці [2]. У мікроелектронних середовищах субмікронних приладів працює макроскопічна електродинаміка, збагачена контактними і приповерхневими явищами, тобто, поєднана з суто квантовими ефектами дифузії заряджених частинок з вищих енергетичних рівнів на нижчі рівні контактуючої області або на поверхневій рівні (рівні Тамма і рівні Шоклі). Це саме стосується і магнітних зарядів, які можуть бути захоплені на поверхневій магнітній рівні [3]. В субмікроелектронних середовищах проявляються колективні явища екранування хмаринною заряджених частинок внесеного в середовища з порушенням його електронейтральності надлишкового заряду. У разі аналітичного опису процесів у цих середовищах використовуються параметри: дебаївський радіус екранування, довжина вільного пробігу заряджених частинок, їх час життя.

У наноструктурах проявляються виняткові електромагнітні властивості середовища, гігантський магнітний опір, за відкриття якого Петер Грюнберг та Албер Ферт удостоєні Нобелівської премії за 2007 рік.

Розгляд виняткових електромагнітних явищ необхідно розпочинати з вивчення впливу розривів атомних зв'язків на поверхні на характеристики наноплівки, яка містить невелику кількість моношарів атомів, а тому явища у найближчих приповерхневих шарах роблять особливо великий внесок у загальні характеристики плівки. Розриви атомних, міжмолекулярних та внутрішньомолекулярних зв'язків приводять до утворення поверхневих електронних станів, на які захоплюються вільні електрони. Всі ці явища сповна використовуються в пристроях мікро- та субмікроелектронної галузі техніки.

Наука, яка обслуговує цю царину, враховує не тільки заряди носіїв, але їх енергетичний стан, глибину залягання рівня Фермі в контактуючих областях визначає напрям руху носіїв заряду. Крім рівнянь електродинаміки, математичні моделі процесів струмоперенесення містять моделі дифузійних процесів перенесення заряджених частинок, враховуючи їх енергетичний стан. Завдяки інформації, закладеній в енергетичних діаграмах структур, будуються граничні умови в польових моделях, і, отже, враховуються контактні і поверхневі явища, явища захоплення носіїв заряду на енергетичні рівні дефектів і дислокацій, враховується вплив домішок на властивості середовищ, Тепло, яке надійшло в локальну область середовища, змінює енергетичний стан його носіїв, що є основою для побудови розширених польових моделей, які враховують одночасне струмо- і теплоперенесення в структурах і взаємний вплив цих двох відмінних за фізичною природою явищ.

Сьогодні провідною ідеєю є розвиток нанонауки, яка в найближчий відтинок часу створить принципово нову фізику – нанофізику і широченну нанопромисловість, нову хімію – нанохімію, в якій питання каталізу і швидкості хімічних реакцій отримують принципово нові ідеї, нанобіологія і наномедицина дозволять створити теоретичну базу для розуміння внутрішніх процесів у живому організмі, дозволить їм вийти з суто емпіричного стану, в якому вони тепер перебувають.

Наноструктури займають розмірний діапазон  $(1\div 100)\cdot 10^{-9}\text{м}$  – оригінальну нішу між пристроями атомної інженерії, де панують закони квантової механіки і розглядається поведінка окремих атомів, і мікроелектронними пристроями, в яких фізичні властивості мікроелектронних середовищ все-таки визначаються колективними властивостями континуумів носіїв заряду.

Наш підхід у дослідження наносвіту ґрунтується на необхідності врахування порушень спінового порядку в приповерхневій області наноструктури. Для того, щоб система володіла мінімумом енергії, спіни електронів на поверхні повинні бути паралельними ( $1/2$  та  $1/2$ ), тоді як у товщі середовища вони антипаралельні ( $1/2$  та  $-1/2$ ) (правило Хунда). Це зумовлює утворення поверхневого шару магнітних зарядів і індукованого в плівці розподіленого магнітного заряду зворотної полярності.

Подвійний шар магнітних зарядів наноплівки і його взаємодія з подвійним шаром електричних зарядів півки – це основа для виняткових електромагнітних явищ у наносередовищах.

Отже, розроблення теорії наносередовищ повинно ґрунтуватись на врахуванні в математичних моделях процесів захоплення носіїв магнітного і електричного зарядів на магнітні поверхневі рівні і поверхневі електронні стани. М.С. Хайкин [3] охарактеризував магнітні поверхневі стани як квантові енергетичні рівні електронів провідності, що рухаються поблизу поверхні за наявності паралельно їй постійного магнітного поля. Для потреб нанотеорії поняття поверхневих магнітних рівнів потрібно розширити. Розрив атомних зв'язків на поверхні наноплівки спричиняє до збурення спінового порядку і вже в приповерхневому шарі спіни електронів стають паралельними. Внаслідок цього локальна приповерхнева область наноплівки отримує некомпенсований магнітний момент, а, значить, правомірною є думка, що до поверхні прикріпився магнітний заряд, який у товщі півки зумовить появу своєї діонної пари – магнітного заряду протилежної полярності.

Утворюється подвійний шар магнітних зарядів, якому в сучасній технічній літературі не надано належної ваги. Існування подвійного електричного шару зарядів у приповерхневій області наноплівки добре відоме, старанно вивчене і його вплив на електромагнітні властивості наноструктур, на формування їх особливих характеристик загалом зрозумілий. Наночастинка речовини надовго залишається намагніченою, але через те, що вона об'єднується з іншою наночастинкою, і вони розташовуються зустрічно, намагніченість областей залишається зникомо малою, крім вузьких приповерхневих шарів, у яких цей принцип зустрічного розміщення наночастинок не виконується. Наноплівка складена з невеликої кількості моношарів, тому ці приграничні шари роблять такий великий вклад у виняткові властивості наноплівкової речовини.

У наноструктурах правомірним є твердження про наявність поверхневого магнетизму. Цей поверхневий магнетизм – це не що інше, як доменна стінка. У ній відбувається перехід від об'ємного стану намагніченості до поверхневого. Динаміка цього процесу описується рівнянням Ландау-Ліфшиця

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = [\mathbf{M}_c \mathbf{H}_{\text{еф}}], \quad (1)$$

де  $\mathbf{J}$  – намагніченість локального об'єму речовини,  $[\mathbf{M}_c \mathbf{H}_{\text{еф}}]$  – член, який характеризує процес захоплення магнітних зарядів на поверхневі магнітні рівні.

Наноплівка оповита подвійним шаром магнітних зарядів, інтенсивність якого легко наближено оцінити. Нехай густина розірваних атомних зв'язків на поверхні півки становить  $1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ . Якщо вважати, що кожний розірваний атомний зв'язок спричиняє появу поверхневого магнітного рівня, на який захоплюється квант магнетизму, то поверхнева густина магнітного заряду становитиме  $\sigma_M = 3,2 \cdot 10^4 \text{ Вб/м}^2$ . Збурений внаслідок розриву атомного зв'язку спіновий континуум зумовлює появу в приповерхневій області некомпенсованого магнітного моменту. Елементарна його частка – магнетон Бора  $\mu_B$  становить  $9,274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . На основі теореми Гаусса його можна пов'язати з квантом магнетизму, захопленого на поверхневий магнітний рівень. Для неферомагнітної наноплівки цей зв'язок виглядає так:

$$\mu_0 \mu_B = 2\pi r \cdot \Phi_0, \quad (2)$$

де  $\Phi_0$  – квант магнетизму ( $\Phi_0 = 2,06 \cdot 785 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ ).

Враховуючи співвідношення (2), отримуємо радіус площі поверхні півки, на який припадає один квант магнетизму ( $r = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ).

Якщо поверхневий магнітний рівень віддалений від магнітного рівня у магнітонеітральному стані на  $0,04 \text{ А}$ , то енергія  $W_M$  верхнього шару магнітної доменної стінки – поверхневого листка магнітних зарядів становитиме  $640 \text{ Дж/м}^2$ . Характеристична довжина  $l$  загасання магнітного поля під час віддалення від поверхні становить  $16 \text{ нм}$ .

Потужність  $P$  доменної стінки становить величину

$$P = \frac{dW_M}{dt}. \quad (3)$$

Сила, що діє на доменну стінку

$$F = \frac{dW_M}{dx}. \quad (4)$$

Індукований у товщі плівки об'ємний магнітний заряд з густиною  $\rho_M$  становить

$$\rho_M l = \sigma_M, \quad (5)$$

тобто  $2 \cdot 10^{12}$  Вб/м<sup>3</sup>.

Густина магнітного поля окремої наночастинки на порядки вища, ніж у мікрочастинок фероматеріалів. Але в локальних областях наноструктур внаслідок об'єднання наночастинок у діонні пари з зустрічними магнітними моментами результуюча густина магнітного поля різко знижується.

Спіновий магнітний момент  $M_C$  пов'язаний з поверхневою густиною магнітних зарядів:

$$M_C = \sigma_M l. \quad (6)$$

Імпульс доменної стінки  $p$  і спіновий магнітний момент зв'язані співвідношенням

$$p = -\frac{m}{\mu_0 e} M_C. \quad (7)$$

Елементарні збудження спінового континууму зумовлюють приповерхневі спінові хвилі. Ці низькочастотні хвилі виникають під дією  $[M_C H_{\text{эф}}]$  у рівнянні (1). Відомий і частотний спектр цих хвиль:

$$\omega = \gamma(H + \alpha M_0 k^2), \quad (8)$$

де  $M_0$  – значення магнітного моменту у рівноважному стані,  $k$  – квазіхвильовий вектор.

Приповерхневий шар наноплівки – це саме та доменна стінка, якою останнім часом так серйозно займається велика група виданих вчених [4–7]. Створено математичні моделі процесів у доменній стінці на основі теорії обмінних взаємодій, яка досліджує взаємний вплив тотожних частинок. Ці моделі адекватно відтворюють нанопроцеси у доменних стінках, але вони занадто громіздкі, щоб знайти широке практичне застосування.

Наш підхід ґрунтується на зображенні доменної стінки у вигляді подвійного шару магнітних зарядів. Розглядається діонна пара зарядів: захопленого на магнітні поверхневі рівні, і заряду іншої полярності, індукованого і розподіленого в товщі плівки. Для цієї діонної пари отримано всі основні характеристики: енергію, імпульс, потужність, сили взаємодії і динаміку перебудови. Ця теорія дозволяє розраховувати фотонні хвилі, які випромінює або поглинає діонна структура під час перебудови.

Фотони переносять електромагнітну взаємодію між зарядженими частинами. Випромінюються вони на границі розділення середовища в ультрафіолетовому та рентгенівському діапазоні частот. У змісті класичної фізики фотони не є матеріальними частинками. Проте їх можна охарактеризувати масою  $m$ , імпульсом  $p$ :

$$m = \frac{h\nu}{c^2}; \quad (9)$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (10)$$

Довжину хвилі випромінювання  $\lambda$  у нанометрах визначають з формули

$$\lambda = \frac{1240}{A}, \quad (11)$$

де  $A$  – робота виходу електрона.

Фотонне поле має запас енергії, яку віддає порціями. Ця порція породжує пару електрон-позитрон. Найнижчий енергетичний стан поля – це фотонний вакуум. У Космосі концентрація фотонів 400–500 см<sup>-3</sup>. Фотонне поле має корпускулярну природу і здатність випромінювання хвиль.

З позицій електродинаміки можна виділити заряди (нерухомі і рухомі) та супроводжуюче електромагнітне поле і спіни з беззатратним полем обертання (ліво- або правогвинтовим).

При коливаннях електромагнітного поля народжуються і пропадають фотони, з'являються і зникають електрон-позитронні пари (час життя миттєвого електрона  $10^{-21}$  с, миттєвого нейтрона  $10^{-24}$  с).

Розвиток нанонауки спричинив появу нової електродинаміки, яка враховує обертальні властивості матерії, спин і фотон. Суто квантові явища, пов'язані з існуванням електронних станів і поверхневих магнітних рівнів, з контактними і поверхневими явищами (правило Хунда), – невід'ємна складова електродинаміки наноплівкових середовищ.

Електродинаміка Максвелла, побудована в межах макроскопічних уявлень, для існування магнітного поля вимагає наявності джерела – витка зі струмом.

Електродинаміка наносередовищ дозволяє існування магнітного поля і без витка зі струмом, наприклад, у приповерхневій області наноплівки при збуренні спінового континууму, у разі переходу магнітних наночасток з стану, коли їхні магнітні моменти є зустрічними в поверхневий стан, в якому з метою одержання мінімуму енергії в локальній області ці магнітні моменти стають паралельно скерованими.

Особливо великі можливості проявляються під час розкриття механізмів функціонування нанoeлементів об'єктів живої природи. Абсолютно фантастична просторова орієнтація бджіл, мурашок, голубів з нанопозицій стає зовсім зрозумілою. Нанoeлементи  $Fe_3O_4$  з розмірами 0,5–1 нм з яскраво вираженими магнітними властивостями є тими компасами, які створюють просторову орієнтацію. Перехід іонів Na, K з вищих енергетичних рівнів з однієї сторони мембран клітин серцевих м'язів на нижчі рівні з протилежної сторони мембран, розкриває величезні можливості у лікуванні серцевих і гіпертонічних захворювань. Керована зміна зарядового стану ракових клітин, клітин імунної системи організму створює нові можливості в онкології та у разі порушень обмінних процесів у організмі.

У людському мозку сконцентровано  $10^{10}$  нейронів. Розвинена сенсорна система людського організму дає змогу перетворювати найрізноманітніші сигнали, що надходять з навколишнього світу, в електромагнітні сигнали і розповсюджувати їх волокнами нервової системи, доносити їх до різних ділянок мозку, переробляти цю інформацію і за допомогою фотонних хвиль зв'язувати ділянки між собою та з іншими органами, керувати виконавчими механізмами організму. Поле і елементи фізичного тіла працюють у взаємозв'язку одночасно або з часовими затримками і виконують функції генерування думки, виробництва і перетворення енергії й інформації.

Під час розщеплення білків і жирів за рахунок захоплення ними порцій енергії відбувається рознесення електричних і магнітних зарядів. Пропорційно  $r^2$  зменшується енергія локальних областей, що супроводжується утворенням мікрочастинок, які розповсюджуються у формі фотонних хвиль, які є основою внутрішніх зв'язків в організмі та його зв'язків з зовнішнім світом. Телепатичні впливи на інших людей, на інші живі організми в основі своїй мають фотонне поле.

Фотонна хвиля – це плоска електромагнітна хвиля право- або лівогвинтової орієнтації, переважно беззатратно обертальна, піддається розрахунку. У виконаних розрахунках молекула мітохондрії під час розщеплення виділяє 7200 фотонів, частота синусоїдного сигналу становить  $0,54 \cdot 10^{12}$  Гц, напруженості електричного і магнітного полів –  $E_m = 2,2 \cdot 10^{-7}$  В/м,  $H_m = 2,1 \cdot 10^{-5}$  А/м.

Різні стресові ситуації спричиняють до розщеплення певних типів білків, жирів, які випромінюють фотонні хвилі іншого частотного діапазону. Всередині організму є слабкі електромагнітні взаємодії, слабке свічення дуже малої інтенсивності. Це свічення на певних частотах утворює ауру над головою людини, і може бути сфотографоване. Магнітні індукції у внутрішніх полях живого організму переважно малі ( $10^{-14}$ – $10^{-12}$  Тл), тоді як у рукотворній магнітній техніці доводиться мати справу з 1–1,2 Тл.

Математичне моделювання електромагнітних процесів у наносередовищах здійснюється на основі симетричної системи рівнянь електродинаміки:

$$[\mathbf{H}] = \delta_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (12)$$

$$[\mathbf{E}] = -\delta_m - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (13)$$

$$\nabla \mathbf{B} = \rho_m, \quad (14)$$

$$\nabla \mathbf{D} = \rho_e, \quad (15)$$

де  $\mathbf{d}_e$  та  $\mathbf{d}_m$  – вектори густин електричного та магнітного струмів відповідно,  $\rho_m$  та  $\rho_e$  – густини розподілених об'ємних зарядів відповідно.

У використуванні в класичній електродинаміці системі граничних умов [8, 9] з'являються видозмінені складові

$$(\mathbf{n}_0, \mathbf{B}_2) - (\mathbf{n}_0, \mathbf{B}_1) = \sigma_m, \quad (16)$$

$$(\mathbf{n}_0, \mathbf{d}_{m1} + \frac{\partial \mathbf{B}_1}{\partial t}) = (\mathbf{n}_0, \mathbf{d}_{m2} + \frac{\partial \mathbf{B}_2}{\partial t}), \quad (17)$$

які враховують поверхневий магнітний заряд  $\sigma_m$  наноплівки і густину магнітного струму  $\mathbf{d}_m$ .

На основі рівнянь (12)–(15) і граничних умов (16)–(17) можна розкрити механізми виникнення гігантського магнітного опору в наноплівкових середовищах.

На наноплівку у формі тора намотано обмотку. Напруженість магнітного поля  $\mathbf{H}$  у наноплівці, зумовлена цією магніторушійною силою  $Iw$ , становить

$$\mathbf{H} = \frac{Iw}{l}, \quad (18)$$

де  $l$  – довжина плівки.

Товщина плівки співрозмірна з магнітним диполем, утвореним захопленням на поверхневий магнітний рівень зарядом та індукованим у плівці зарядом протилежної полярності. Напруженість магнітного поля, створеного магнітним зарядом, розраховується на основі теореми Гаусса. У пристосованому до магнітного заряду варіанті вона має вигляд

$$\oint_s \mathbf{B} ds = \Phi_0. \quad (19)$$

Напруженість магнітного поля у перпендикулярному до плівки напрямі, розрахована з використанням формули (19)

$$H_{\perp} = \frac{B}{\mu_a}, \quad (20)$$

принаймні на чотири порядки більша від поздовжньої складової  $H_{\parallel}$ , зумовленої магнітним джерелом  $Iw$ . Через наявність грандіозної величини напруженості магнітного поля у поперечному напрямку магнітний потік у поздовжньому напрямку має зникло малу величину. Отже, магнітний опір наноплівки стає дуже великим – “гігантським”.

Явище гігантського магнітного опору відразу знайшло широке практичне застосування в твердих дисках для комп'ютерів. На основі поєднання феромагнітних і неферомагнітних шарів (FeCr, FeCrFe) та на основі оксидів створено елементи на 20 Гбит.

**Висновки.** 1. Наномагнітні елементи мають виняткові електромагнітні характеристики, гігантський магнітний опір. За рахунок незначних змін магнітного поля можна отримувати значні зміни опору, прикладення сторонніх магнітних полів до плівки у поздовжньому і поперечному напрямках зумовлює протилежні ефекти.

2. Стає можливим використання в пристроях інформатики напрямку спіна. Реальністю стають спінові заслони в елементах спінтроники.

3. Для здійснення розрахунків у пристроях з наномагнітними елементами придатна симетрична система рівнянь електродинаміки.

1. Дрекслер Э. Нанотехнологии на стадии машин // *Світ науки*. – 2001. – № 5. – С. 62–63.
2. Наумовец А.Г., Федорус А.Г. Исследование структуры и работы выхода пленок платины на вольфрам и адсорбции в них цезия // *Физика твердого тела*. – 1968. – Т. 10, вып. 3. – С. 801–808.
3. Хайкин М.С. Магнитные поверхностные уровни // *УФН*. – 1968. – Т. 96. – С. 409.
4. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. – К.: *Наук. думка*, 1968. – 159 с.
5. Вакарчук І.О. Квантова механіка. – Львів: *Вид-во Нац. ун-ту ім. І. Франка*, 2004. – 783 с.
6. Юхновський І.Р. Квантова

механіка. – К.: Либідь, 2002. – 390 с. 7. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Магнитные наноструктуры. – Воронеж: ВГТУ, 2003. – 113 с. 8. Захарія Й.А. Методи прикладної електродинаміки. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 351 с. 9. Пеленський Р.А. Симетрична система рівнянь електродинаміки // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 587. – С. 75–80.

УДК 621.3.019:51.001

О.Г.Плахтина, А.С.Куцик, О.О.Кузнєцов  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЕНЕРГІЄЮ КОВЗАННЯ

О Плахтина О.Г., Куцик А.С., Кузнєцов О.О., 2008

**Проаналізовано роботу асинхронного електропривода зі збудженням від енергії ковзання. Модифіковано алгоритм керування машиною подвійного живлення. Наведено результати експериментальних досліджень.**

**Functioning of induction electric drive with slip energy exciting has been analyzed. Doubly fed machine's control algorithm has been improved. Results of experimental investigations are described.**

**Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень.** Електромеханічні системи на основі машин подвійного живлення (МПЖ) набувають все більшого застосування у енергетиці та промисловості через низькі капітальні затрати, що пояснюється меншою потужністю перетворювача частоти в колі ротора у разі обмеженого діапазону регулювання швидкості, можливість незалежного регулювання моменту і коефіцієнта потужності статора.

Запропоновано\* систему керування асинхронною машиною (АМ) з фазним ротором на основі схеми МПЖ, що передбачає векторне керування напругою ротора. До того ж забезпечується можливість регулювання швидкості АМ як нижче, так і вище від синхронної та робота АМ з одиничним коефіцієнтом потужності. Перевагами цього алгоритму є його простота та інваріантність до частоти напруги статора. Крім того, у цій схемі є можливість використання енергії ковзання для виконання задач керування. Однак, ці особливості схеми вимагають додаткових досліджень, які є предметом статті.

**Теоретичні засади збудження асинхронної машини енергією ковзання.** Електрична потужність, що підводиться до двигуна з мережі, перетворюється в механічну, що відбирається з вала машини. Це перетворення супроводжується втратами.

До двигуна підводиться з мережі електрична потужність

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

яка частково іде на покриття втрат в обмотці статора  $P_{ст}$ , а решта – електромагнітна потужність  $P_{ем}$  – передається в ротор. Частина електромеханічної потужності – енергія ковзання  $P_s = s P_{ем}$  – витрачається на нагрівання міді обмоток ротора, а решта перетворюється в повну механічну

---

\* Плахтина О.Г., Куцик А.С., Йовбак В.Д. Електромагнітні та електромеханічні процеси асинхронної машини з інвертором напруги в колі ротора при векторному керуванні // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 30–36