

УДК 621.3.042(088.8)

### ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ І СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОСТОРОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

**О.О. Плахтир**, кандидат технічних наук

**Д.Л. Кошкін**, кандидат технічних наук

*Миколаївський державний аграрний університет*

*Розглянуто особливості, засоби удосконалення та показники порівняльного аналізу варіантів конструкторсько-технологічних рішень просторових електромагнітних систем статичних індукційних пристроїв.*

**Ключові слова:** статичні індукційні пристрої, електромагнітні системи, показники якості, керовані змінні.

Основним типом електромагнітної системи (ЕМС) трифазних статичних індукційних пристроїв (СІП) є асиметрична планарна з шихтованими магнітопроводами [1,2]. Такі магнітопроводи містять стрижні і ярма прямокутного перерізу (ЕМС малої потужності і початкових габаритів середньої потужності) або вписаного в коло ступінчастого перерізу з пакетів електротехнічної сталі (ЕТС) різної ширини (ЕМС середньої і великої потужності). Названі ЕМС і магнітопроводи за показниками питомої матеріаломісткості, а також трудомісткості виробництва не задовольняють сучасним вимогам. Подальше удосконалення трифазних трансформаторів, реакторів і дроселів можливо на основі просторових магнітних симетричних ЕМС (СЕМС) [2-5]. Також, згідно з існуючими дослідженнями [1-6], зниження технологічної матеріаломісткості і трудомісткості виробництва досягається виготовленням магнітопроводів способом навивки із стрічки або рулону ЕТС.

Просторові ЕМС відрізняються, за класифікацією [5], типом конструкції і технології виготовлення магнітопроводів. Тип конструкції визначається напрямом магнітного потоку

(радіальний, аксіальний) і формою перерізу (прямокутник, коло) стрижнів, наявністю і кількістю технологічних стиків, а також способом з'єднання стрижнів (трикутник, зірка). За типом технології СЕМС підрозділяються на шихтовані, шихтовано-пресовані, виті і комбіновані.

На рис. 1 представлено варіанти конструкції СЕМС з радіальним потоком стрижнів – початкова за типом циліндричних магнітопроводів асинхронних машин (рис. 1, а), а також з витими ярмами і шихтованими із зігнутих листів стали стрижнями (рис. 1, б).

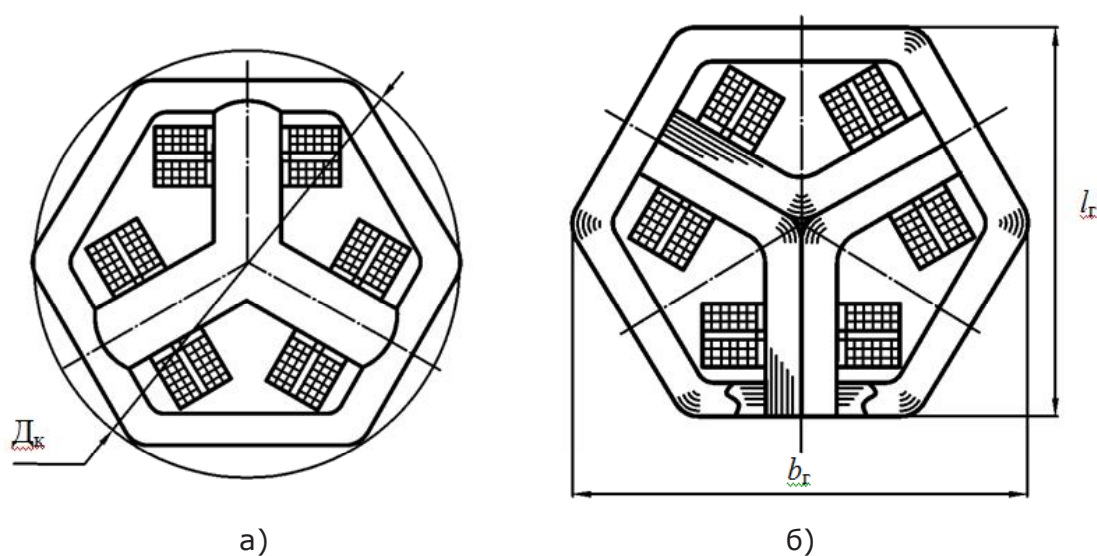


Рис.1. Варіанти схеми поперечного перерізу просторової електромагнітної системи з радіальним потоком стрижнів, а також шихтованим (а) і комбінованим (б) магнітопроводами

Деякі варіанти СЕМС з аксіальним напрямом потоку стрижнів відповідно представлені: на рис. 2, а, б – замкнені трикутником потужністю до 6300 кВА і потужністю до 630 кВА [2]; на рис. 2, в – із сполученими зіркою ярмовими ділянками з витих розрізних елементів потужністю до 100 кВА [6].

**Мета роботи.** Представлена робота спрямована на вирішення задачі визначення показників оцінки технічного рівня варіантів СЕМС з метою можливості їх структурної оптимізації.

**Викладення основного матеріалу.** Представляється, що зіставлення СЕМС може бути виконане на основі двох груп показників і ознак (основних і допоміжних). Перша група може складатися з кількісних величин, що визначають технічні

характеристики [7]. Другій групі повинні відповідати характерні особливості і ознаки технічного рівня, які визначають трудомісткість виготовлення, струм холостого ходу, додаткові втрати, а також функціональні можливості [3].

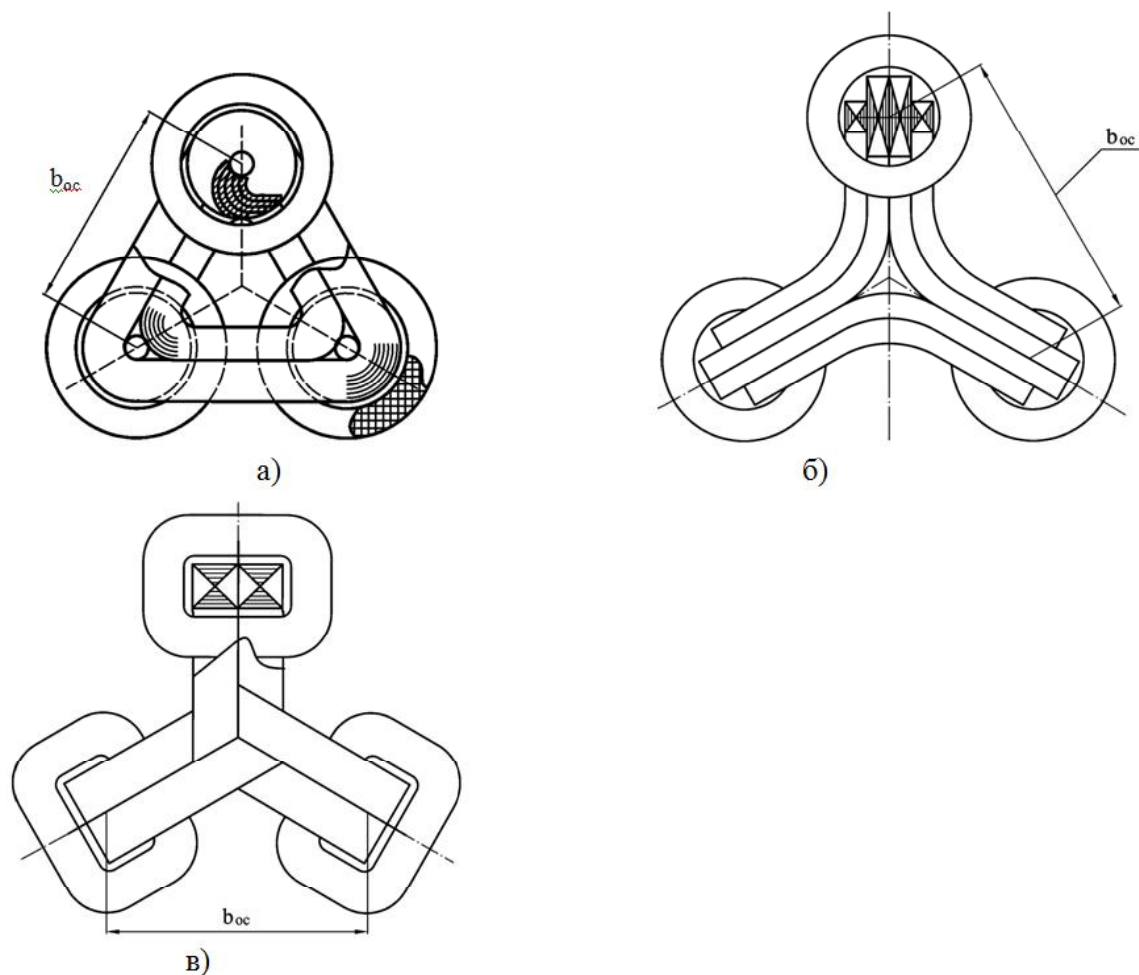


Рис.2. Варіанти схем просторової електромагнітної системи з аксіальним потоком стержнів і комбінованим (а), витим триконтурним (б), а також витим розрізним (в) магнітопроводами

Величини першої групи можна визначити, керуючись [7], на основі комплексного показника якості

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i m_i, \quad (1)$$

де  $q_i$  – відносний показник, який визначається відношенням однотипних  $i$ -х параметрів з номенклатури  $n$  основних показників функціональної і технічної ефективності нової розробки

і умовно базового аналога порівнюваних пристроїв електро-механіки;  $m_i$  – коефіцієнт вагомості  $i$ -го параметра, встановлений експертним методом, причому для  $n$  показників якості

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i m_i. \quad (1)$$

Відповідно до існуючих стандартів [7], основними для СЕМС є показники об'єму і габаритних розмірів, питомої матеріаломісткості і вартості, коефіцієнта корисної дії (ККД), а також рівня відходів ЕТС.

**Методика досліджень.** Перший показник  $q_1$  порівняння базового і порівнюваного варіантів можна визначити на основі коефіцієнта  $K_{\text{ко}}$  використання геометричного об'єму [5] вказаних варіантів:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{\Pi_{\text{ак}}}{\Pi_{\text{ко}}} ; \\ &= \frac{\Pi_{\text{к}}}{\Pi_{\text{гр}}} ; \\ &= \frac{b_{\text{г}} l_{\text{г}}}{D_{\text{к}}^2} , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $\Pi_{\text{ак}}$  – площа активних перерізів;  $\Pi_{\text{ко}}$  – площа, обмежена контурним колом діаметром  $D_{\text{к}}$  (рис. 1, а);  $\Pi_{\text{гр}}$  – площа контуру габаритних розмірів  $b_{\text{г}}$  і  $l_{\text{г}}$  (рис. 1, б).

Варіант коефіцієнта (2) визначається особливостями об'єкту установки ( $K_{\text{ко}}$  – в циліндричному корпусі;  $K_{\text{ко}}$  – у прямокутному блоці системи електроустаткування).

Загальним недоліком усіх варіантів СЕМС з прямокутним перерізом стрижнів, що наближається до кола, є невисоке значення коефіцієнта  $K_{\text{ко}}$  ( $K'_{\text{ко}}$ ).

Величина  $K_{\text{ко}}$  ( $K'_{\text{ко}}$ ) і компактність СЕМС можуть бути підвищені способом зменшення міжосьової відстані (рис. 2, 3) геометричних центрів перерізів стрижнів на основі нетрадиційних конфігурацій стрижнів, ярем і котушок обмотки (див. рис. 3), стінок обмотувальних вікон, що забезпечують паралельність [5].

Стрижні можуть бути виконані з витої розрізної заготівлі з тригранною утворювальною (рис. 3, а), а також з розрізних або сплюснутих витих концентричних заготівель (рис. 3, б).

Схеми (рис. 3, в і г) характеризують СЕМС для СІП потужністю до 10 МВА з тригранними внутрішніми контурами витих ярем і стрижнями з витих елементів тригранної форми, а також з ідентичних прямокутних пластин (листів) ЕТС утворених поперечним розділенням стрічки (рулону) ЕТС.

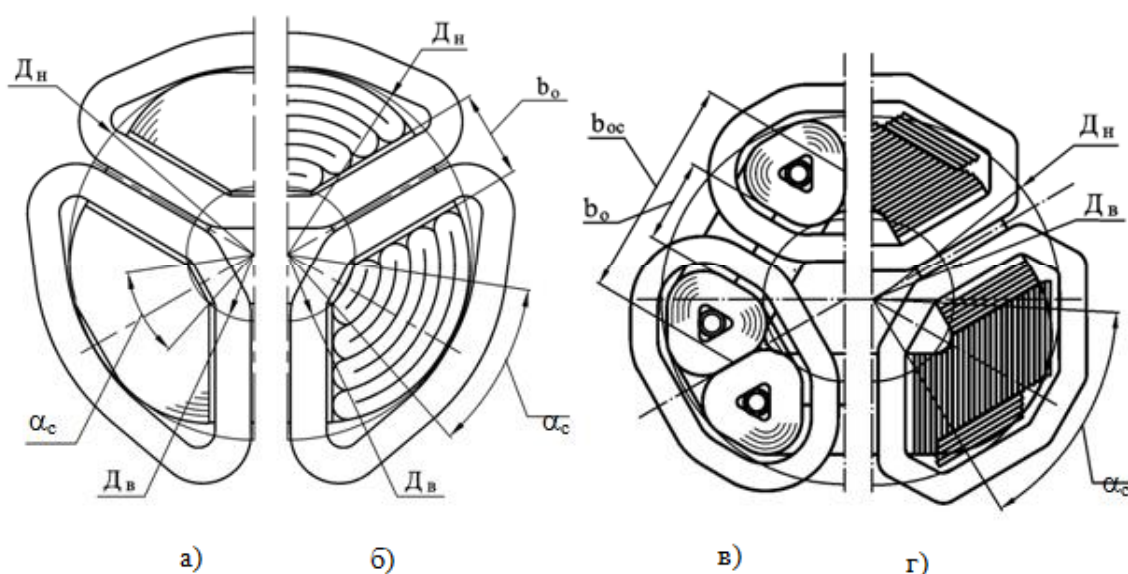


Рис.3. Варіанти схеми просторової електромагнітної системи з паралельними стінками обмотувальних вікон і витими (а-в) і комбінованим (г) магнітопроводами

Другий, третій і четвертий показники ( $q_2, q_3, q_4$ ) можна визначити на основі окремих критеріїв оптимізації СІП (відповідно мінімумів маси, вартості і втрат) за наявності математичних моделей з ідентичними для усіх варіантів СЕМС керованими змінними. Вказані критерії, як правило, визначаються при проектних обмеженнях, що відповідають конкретним вимогам (наприклад, напруга короткого замикання  $U_k$  чи струм холостого ходу відповідно силового або вимірювального трансформатора).

Оскільки кожна з можливих принципових схем СЕМС може бути реалізована з різним числом стиків на фазу, величина струму холостого ходу при визначенні кількісних показників структурної оптимізації може не враховуватися. Наявність стиків повинна братися до уваги при виборі базового варіанту



на стадії параметричної оптимізації конкретного СІП. Згідно з дослідженнями Бальна Р.Х. [1], активна і реактивна складові  $U_k$  залежать від електромагнітної потужності трансформатора  $S$ , частоти мережі  $f$  і співвідношення електромагнітних навантажень (щільності струму обмоток  $\Delta$  і індукції стрижня  $B_c$ ):

$$\left. \begin{aligned} U &\equiv \sqrt[4]{\Delta^3} / \left( \sqrt[4]{S} \sqrt[4]{f^3 B_c^3} \right); \\ U &\equiv b'_0 \Delta / B_c, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $b'_0$  – складова, що визначається розмірами котушок і ізоляційного проміжку в межах половини ширини  $b_0$  обмотувального вікна (див. рис. 3).

Із співвідношень (3) витікає, що залежні від керованих змінних і визначальні цільові функції  $q_2, q_3, q_4$  математичних моделей СІП не повинні містити початкових даних, технічних вимог і електромагнітних навантажень.

Слід також відмітити, що порівняльний аналіз різних за конструкцією і просторовою формою елементів активної частини порівнюваних пристроїв електромеханіки однакового призначення прийнято виконувати при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності [8]. Цьому принципу відповідають ідентичність потужностей, електромагнітних навантажень, коефіцієнтів заповнення і вживаних матеріалів порівнюваних пристроїв. Позначеним вище вимогам до початкових даних, керованим змінним і цільовим функціям задовольняють математичні моделі трансформаторів [9, 10].

У вказаних моделях цільовими функціями оптимізації СЕМС є відносні коефіцієнти зміни маси  $K_m$ , вартості  $K_c$  і сумарних втрат  $K_{\Pi}$  активної частини. У якості керованих змінних прийняті: відношення  $\lambda_0$  висоти  $h_0$  і ширини  $b_0$  обмотувального вікна, відношення «а» діаметрів розрахункових контурних кіл з діаметрами  $D_H$  і  $D_B$ , а також центральний кут стрижня  $\alpha_c$  (рис. 3):

$$\lambda_0 = h_0 / b_0; \quad \alpha = D_H / D_B.$$

При цьому реальні цільові функції (маси  $m_A$ , вартості  $c_A$  і суми втрат  $P_{\Sigma}$ ) пов'язані з відповідними відносними коефіці-

ентами залежностями, що містять характеристики матеріалів і коефіцієнт початкових даних і електромагнітних навантажень  $K_{\Pi}$ .

Для усіх аксіальних СЕМС типу (рис. 2, 3) залежності  $m_A$ ,  $c_A$  і  $P_{\Sigma}$  від  $\lambda_0$  і  $a$  є унімодальними функціями, а  $\alpha_c$  обмежується конструктивно і технологічно [9, 10]. Тому показники  $q_i$  визначаються значеннями екстремумів  $K_M$ ,  $K_c$  і  $K_{\Pi}$  базового і досліджуваних варіантів при умовно і практично ідентичних у зонах екстремумів (мінімумів) вказаних функцій заздалегідь прийнятих енергетичних показників  $\eta$  і  $\cos\phi_1$ :

$$q_2 = \frac{K_{MЭб}}{K_{MЭ}}; q_3 = \frac{K_{сЭб}}{K_{сЭ}}; q_4 = \frac{K_{ПЭб}}{K_{ПЭ}}. \quad (5)$$

Рівень відходів ЕТС визначається коефіцієнтом

$$q_5 = K_{ЭТСб} / K_{ЭТС}, \quad (6)$$

де  $K_{ЭТСб}$  і  $K_{ЭТС}$  – коефіцієнти відношення маси використаної сталі і маси непросоченого магнітопроводу базового і порівнюваного варіантів.

У другу допоміжну групу особливостей і ознак слід включити: число стиків на фазу; особливості розташування (наявність збігу) шарів сталі, стрижнів і ярем в площинах стиків; наявність і число пересічних площин стиків різних фаз; кількість складових елементів магнітопроводу і наявність серед них ідентичних, кількість одиниць технологічного оснащення, а також необхідність використання складного технологічного устаткування.

Відносні цільові функції також можуть бути використані для двоетапної параметричної оптимізації СІП. На першому етапі визначаються екстремальні значення і ті, які відповідають оптимальним співвідношенням розмірів при заданому критерії оптимізації. На другому етапі при фіксованих  $\lambda_{03}$ ,  $a_3$  і  $\alpha_c$  оптимізуються електромагнітні навантаження при заданих проектних обмеженнях.

**Висновки.** Порівняльний аналіз варіантів СЕМС може бути виконаний на основі п'яти кількісних відносних показни-

ків СІП  $q_i$  ( $i = 1 \dots 5$ ) і щонайменше шести ознак технічного рівня конструкції і технології виробництва магнітопроводів. Універсальними, тобто незалежними від конкретних співвідношень електромагнітних навантажень і придатними для визначення показників  $q_i$ , виходячи з оптимальних геометричних співвідношень кожної з існуючих СЕМС СІП, є відносні цільові функції у вигляді коефіцієнтів зміни маси, вартості і суми втрат, а також керовані змінні геометричної оптимізації:  $\lambda_0$ ,  $a$ ,  $a_c$ .

Література:

1. Бальян Р. Х. Трансформаторы малой мощности / Р. Х. Бальян. — Л. : Судпромгиз, 1961. — 368 с.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. — 4-е изд. перераб. и доп. — М. : Энергия, 1976. — 544 с.
3. Дорожко Л. И. Реакторы с поперечным подмагничиванием / Л. И. Дорожко, М. С. Либкинд. — М. : Энергия, 1977. — 176 с.
4. Орлов Е. Г. Главная задача отраслевой науки – эффективность производства и энергосбережение / Е. Г. Орлов // Электротехника. — 1990. — № 1. — С. 4–6.
5. Плахтырь О. О. Варианты конструкций и классификация пространственных магнітопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов / О. О. Плахтырь // Електротехніка і електромеханіка. — 2002. — № 3. — С. 64–65.
6. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнітопроводами / И. В. Пентегов, С. В. Рымар, А. В. Лавренюк и др. // Вісник НТУ «ХПІ»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — Харків : НТУ «ХПІ». — 2002. — № 14. — С. 86–87.
7. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. — М. : ВНИИ стандартэлектро, 1989.
8. Паластин Л. М. Электрические машины автономных источников питания / Л. М. Паластин. — М. : Энергия, 1972. — 464 с.
9. Ставинский А. А. Зависимости массо-стоимостных показателей трехфазных пространственных трансформаторов с ромбическими катушками обмоток от геометрических соотношений активной части / А. А. Ставинский, О. О. Плахтырь, Р. А. Ставинский // Електромашинобудування та електрообладнання : міжвід. наук.-техн. зб. — 2002. — Вип. 58. — С. 85–91.
10. Ставинский А. А. Сравнительный анализ материалоемкости вариантов трехфазных пространственных электромагнитных систем / А. А. Ставинский, О. О. Плахтырь // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. — Кременчук : КДПУ, 2003. — Т. 1, № 2 (19). — С. 53–56.