

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський національний політехнічний університет

Насипана Олена Петрівна



УДК 621.314.2

**Моделювання і проектний синтез енергоефективних
трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками**

05.09.01 – Електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Пуйло Гліб Васильович, професор кафедри
електричних машин Одеського національного
політехнічного університету

Офіційні опоненти – доктор технічних наук,
Римар Сергій Володимирович,
старший науковий співробітник
Інституту електрозварювання
Національної академії наук України
(м. Київ)

– кандидат технічних наук, доцент
Кімстач Олег Юрійович, доцент кафедри
суднових електроенергетичних систем
Національного університету кораблебудування
ім. Макарова (м. Миколаїв)

Захист відбудеться « 3 » вересня 2015 р. о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої
вченої ради К 41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за
адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1, ауд. 213У

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського національного
політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1

Автореферат розісланий « 30 » липня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради к.т.н., доцент



О.М. Бесараб

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертаційного дослідження. Важливою проблемою сучасної електроенергетики є проблема зменшення витрат ресурсів і втрат енергії при її виробництві і розподіленні. Особливе значення ця проблема має для енергетичних систем України, в яких втрати електричної енергії складають біля 20% від усієї виробленої енергії. Біля 40% цих втрат складають втрати в трансформаторах класу напруги 6-35 кВ. Тому задача вдосконалення силових трансформаторів на основі використання найбільш перспективних тенденцій і інноваційних технічних рішень в трансформаторобудуванні є актуальною.

В дисертаційній роботі як основні засоби енерго- і ресурсозбереження розглядаються наступні: використання сучасних електротехнічних сталей (ЕТС), провідникових матеріалів, а також оптимальної робочої частоти.

Використання для виготовлення магнітних систем (МС) трансформаторів нових видів ЕТС сприяє вдосконаленню їх конструктивних виконань та технологій виробництва, а також дозволяє зменшити масу і втрати в МС.

Використання для виготовлення обмоток трансформаторів високотемпературних надпровідників (ВТНП) дозволяє значно зменшити масу обмоток і практично усунути навантажувальні втрати. При цьому маса і втрати в МС також зменшуються.

Поряд із зазначеними засобами подальше зниження маси та втрат в трансформаторах може бути досягнуто оптимізацією значення робочої частоти.

Для обґрунтованого впровадження інноваційних технічних рішень у виробництво трансформаторів необхідно вирішити проблему адекватного визначення і оптимізації їх параметрів. Тому актуальною задачею є розробка нових математичних моделей (ММ) трансформаторних пристроїв, які враховують властивості сучасних електротехнічних матеріалів і рівень робочої частоти та забезпечують можливості системного синтезу і аналізу трансформаторів з поєднанням різних інноваційних технічних рішень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричних машин Одеського національного політехнічного університету у відповідності до планів науково-дослідницьких робіт: (1) “Розробка математичних моделей та дослідження процесів в електричних машинах і трансформаторах” (№ держреєстрації 0107U001962, 2007-2011 рр., № держреєстрації 0111U010457, 2012-2016 рр.); (2) “Удосконалення засобів автоматизованого проектування високоефективних електромагнітних, електромеханічних та електромеханотронних перетворювачів” (№ держреєстрації 0109U002616, 2009-2010 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка енерго- і ресурсоефективних силових трансформаторів на основі оптимального поєднання інноваційних технічних рішень, удосконалення засобів їх математичного моделювання і автоматизованого проектування.

Для досягнення мети дослідження поставлені і вирішені наступні задачі:

- огляд існуючих тенденцій розвитку і інноваційних досягнень світового трансформаторобудування з метою визначення найбільш ефективних і перспективних технічних рішень, які забезпечують підвищення енерго- і ресурсоефективності сучасних силових трансформаторів;
- аналіз відомих методик визначення електромагнітних характеристик ЕТС при різних частотах магнітного поля та розробка ММ і алгоритмів їх визначення з високим рівнем точності;
- розробка узагальнених проектних ММ для проектного синтезу і оптимізації трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками;
- формування узагальнених ММ критеріїв оптимального проектного синтезу;
- синтез оптимальних варіантів трансформаторів з використанням інноваційних засобів енерго- і ресурсозбереження.

Об'єкт дослідження – електромагнітні і енергетичні процеси в силових трансформаторах.

Предмет дослідження – проектний синтез силових трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками при використанні інноваційних технічних рішень.

Методи дослідження ґрунтуються на наукових положеннях теорії електричних машин і трансформаторів, теорії оптимізації та математичного моделювання, методів апроксимації, методів системного аналізу і теорії ухвалення рішень.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи визначається такими теоретичними результатами, отриманими автором:

1. Отримав подальший розвиток метод визначення електромагнітних характеристик трансформаторних сталей при різних робочих частотах в діапазоні 50-500 Гц.
2. Вперше розроблені узагальнені проектні ММ силових трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками на основі агрегованих, незалежних керованих змінних (НКЗ), які інваріантні до кількості обмоток і схем їх розміщення, конструктивного виконання МС, матеріалу обмоткового проводу, типу ЕТС і робочої частоти запроєктованого трансформатора.
3. Удосконалено ММ критерію оптимізації.
4. Розроблені аналітичні співвідношення для оптимізації геометрії елементів МС за критерієм мінімуму витрати активних матеріалів при різних формах поперечного перерізу стрижня МС.

Практичне значення отриманих результатів. У дисертаційній роботі виконаний порівняльний аналіз існуючих методик проектного синтезу конструктивних елементів силових трансформаторів. На основі виконаних досліджень розроблені уточнена ММ і методика визначення електромагнітних параметрів ЕТС при різних частотах. Розроблені ММ для проектного синтезу і оптимізації силових трансформаторів з урахуванням структури обмоток, різного сполучення провідникових матеріалів обмоток, конструктивного виконання МС і

робочої частоти досліджуваного трансформатора, які дозволяють з необхідною точністю визначати техніко-економічні показники трансформаторних пристроїв.

Виконаний оптимальний проектний синтез трансформаторів стандартної і підвищеної частоти з обмотками із традиційних і ВТНП обмоткових матеріалів.

Визначені економічно обґрунтовані діапазони оптимальної робочої частоти для трансформаторів з МС із різних ЕТС і обмотками із різних провідникових матеріалів.

Обґрунтовано економічну доцільність застосування трансформаторів підвищеної частоти з ВТНП обмотками.

Вперше виконаний проектний синтез серії оптимальних трансформаторів з поєднанням різних засобів енерго- і ресурсозбереження.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри електричних машин Одеського національного політехнічного університету в курсовому та дипломному проектуванні і в лекційних курсах.

Особистий вклад здобувача. Теоретичні положення і основні результати, представлені в роботі, отримані автором особисто. У наукових роботах, опублікованих в співавторстві, здобувачеві належать: [5,10,11,16] – аналіз особливостей визначення питомих втрат в ЕТС; [3,4,17] – розробка ММ і алгоритму ідентифікації питомих втрат в ЕТС; [1,2,8] – аналіз перспектив підвищення енерго- і ресурсоефективності силових трансформаторів; [6,8,13,14] – розробка позіноміальних оптимізаційних математичних моделей трансформаторів; [7, 9,12,15] – розрахунок основних показників трансформаторів при зміні частоти.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати и положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях, семінарах і публікувалися в збірках наукових праць: науково-практичної конференції молодих учених ОПУ “Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі” (Одеса, 2004) [13]; міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених “Електротехніка і електромеханіка” (Миколаїв, 2004) [14]; International Scientific Conference “Intelligence, Integration, Reliability” (Kyiv, 2010, 2011) [15,16]; міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика” (Одеса, 2011) [17]; міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених “Сучасні Інформаційні Технології 2012” (Одеса, 2012) [18].

Публікації. По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових робіт, в тому числі 12 статей в спеціалізованих наукових виданнях, 6 в матеріалах доповідей науково-технічних конференцій, 2 наукові роботи написані автором особисто.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, переліку умовних позначень, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаної літератури і 17 додатків. Робота представлена на 227 сторінках, з яких 154 сторінки основного тексту, 58 рисунків, 17 таблиць, список використаної літератури з 217 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність удосконалення силових трансформаторів шляхом використання інноваційних технічних рішень, визначені мета, об'єкт, предмет і методи дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, планами, темами, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, висвітлено особистий внесок здобувача та перелік публікацій за темою роботи.

У **першому розділі** розглянуто основні електромагнітні властивості сучасних видів ЕТС, виконано аналіз існуючих методів розрахунку електромагнітних показників ЕТС, визначені їх особливості та недоліки. Розроблені математичні моделі та алгоритм ідентифікації питомих втрат і питомої намагнічуючої потужності в сучасних ЕТС при різних частотах магнітного поля та мінімумі вихідних даних, таких як марка, товщина листа та залежність $B = f(H)$ для даної ЕТС при базовому значенні частоти f .

При зміні величини магнітної індукції в ЕТС змінюється величина магнітної проникності, тому з ростом частоти (при $f > 150$ Гц), необхідно визначати величину магнітної проникності, яка відповідає даній індукції і частоті з урахуванням розподілу індукції по ширині сталюого листа та обмежень по насиченню:

$$\mu = \frac{8\rho}{k_R^2 a^2 \pi f B^2}, \quad (1)$$

де ρ – питомий електричний опір ЕТС; k_R – коефіцієнт зменшення глибини проникнення для нелінійного феромагнітного середовища; a – товщина сталюого листа.

Сумарні питомі втрати в листі ЕТС дорівнюють

$$p_{y\partial} = p_{ex} + p_{ex} = \frac{\pi^2 f^2 a^2 B^2}{6\rho\gamma} k_{bx}(\xi_f) + \frac{2fS_f B^2}{\mu\gamma} k_{rc}(\xi_f), \quad (2)$$

де γ – густина ЕТС; S_f – фактор форми петлі гістерезису; $k_{bx}(\xi_f)$, $k_{rc}(\xi_f)$ – коефіцієнти зменшення втрат в сталі від вихрових струмів і гістерезису, викликані розмагнічуючою дією цих токів; ξ_f – відношення товщини листа ЕТС до еквівалентної глибини проникнення магнітного потоку в ньому.

При $\xi_f \ll 1$, питомі втрати в сталі

$$p_{y\partial} = \frac{\pi^2 f^2 B^2 a^2}{6\rho\gamma} + \frac{2fS_f B^2}{\gamma\mu}. \quad (3)$$

При $\xi_f \gg 1$, питомі втрати в сталі

$$p_{y\partial} = \frac{\pi^{\frac{3}{2}} f^{\frac{3}{2}} B^2 a}{2\gamma k_R \sqrt{\mu\rho}} + \frac{\pi^{\frac{1}{2}} f^{\frac{3}{2}} S_f B^2 a}{\gamma \sqrt{\mu\rho}} = \frac{\pi^{\frac{1}{2}} f^{\frac{3}{2}} B^2 a}{\gamma \sqrt{\mu\rho}} \left(\frac{\pi}{2k_R} + S_f \right). \quad (4)$$

ММ питомої намагнічуючої потужності в елементі ЕТС дорівнює

$$q_{\text{нам}} = \frac{4k_f fBH \sqrt{\int_0^\pi H(B)dt}}{\gamma \sqrt{\int_0^\pi H^2(B)dt}} = \frac{4k_f fBH}{\gamma \zeta_{md}}, \quad (5)$$

де k_f – коефіцієнт форми кривої ЕРС; ζ_{md} – коефіцієнт амплітуди, якій дорівнює співвідношенню амплітудного значення намагнічуючого струму до діючого значення.

На основі аналізу процесу виникнення питомих втрат в ЕТС і ряду методик їх розрахунку, запропоновано ММ і метод уточненого визначення електромагнітних параметрів ЕТС, які дозволяють з високим ступенем точності (до $\pm 1\%$) визначати питомі втрати і намагнічуючу потужність для різних видів, марок і товщин ЕТС при різних частотах магнітного поля і мінімумі вихідних даних.

У **другому розділі** розроблені узагальнені проектні ММ на основі агрегованих НКЗ для проектного синтезу і оптимізації трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками, інваріантні до кількості обмоток, матеріалу обмоткового проводу, конструктивного виконання МС і робочої частоти, трансформатора, який досліджується. Запропоновані ММ часткових критеріїв проектної оптимізації і уточнена ММ критерію повної капіталізованої вартості для пошуку їх оптимальних значень при вирішенні задач проектного синтезу трансформаторів з високими показниками енерго- і ресурсоефективності.

Для реалізації проектних досліджень в узагальненому вигляді і скорочення числа НКЗ на етапі дослідницького проектування використовувалась узагальнена ММ з еквівалентною обмоткою, яка замінює множину реальних обмоток і дозволяє скоротити розмірність задачі проектного синтезу за рахунок використання агрегованих НКЗ і спрощення її структури.

Найбільш суттєвою змінною в ММ трансформатора є параметр S_{cm} – площа поперечного перерізу стрижня МС. Але при одному і тому ж значенні S_{cm} форма поперечного перетину стрижня МС і співвідношення її основних розмірів можуть бути різними. Якщо форма поперечного перерізу стрижня МС не є кругом або квадратом, то довжина (або периметр) твірної L , описаної навколо поперечного перерізу стрижня, залежить від співвідношення його основних розмірів. Це, в свою чергу, зумовлює різне значення середньої довжини витків концентрів обмоток, які розташовані на цьому стрижні. Для урахування цього конструктивного фактору зручно використовувати довжину (або периметр) твірної, яка описана навколо поперечного перерізу стрижня, представлену через його основні геометричні розміри – ширину t_m і висоту (товщину) h_m , або через один з основних розмірів (t_m) і співвідношення $\alpha = h_m / t_m$:

$$L = \psi(t_m + h_m) = \psi t_m (1 + \alpha), \quad (6)$$

де ψ – коефіцієнт форми поперечного перерізу стрижня МС (табл.).

Площу поперечного перерізу стрижня в загальному вигляді можна представити через основний розмір t_m і співвідношення α

$$S_{cm} = \vartheta t_m^2, \quad (7)$$

де ϑ – коефіцієнт пропорційності між S_{cm} і t_m , який для кожної з форм твірної може бути виражений через α і представлений в таблиці.

Таблиця – Коефіцієнти форми і коефіцієнти пропорційності для різних видів форм поперечного перерізу МС

Форма поперечного перерізу	Коефіцієнти форми ψ	Коефіцієнт пропорційності ϑ
прямокутна	2	$\vartheta = \alpha$
квадратна	2	$\vartheta = \alpha = 1$
еліптична	$\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\lambda^2}{4} + \frac{\lambda^4}{64}\right),$ $\lambda = \frac{h_m - t_m}{h_m + t_m} = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}$	$\vartheta = \frac{\pi}{4} \alpha$
кругла	$\frac{\pi}{2}$	$\vartheta = \frac{\pi}{4} \alpha, \alpha = 1$
правильна багатокутна	$Z \operatorname{tg} \frac{\pi}{2Z},$ де Z – кількість сторін багатокутника	$\vartheta = \frac{Z}{4} \alpha \sin \frac{\pi}{Z},$ $\alpha = \cos \frac{\pi}{Z}$

Основні розміри МС визначаються розмірами “вікна” і поперечного перерізу стрижня та обумовлені розмірами обмоток і ізоляції. Ширина “вікна” МС

$$F = F_o + l_q, \quad (8)$$

де F_o – сумарна ширина обмоток у “вікні”, дорівнює

$$F_o = \frac{1}{3b_n} \left[\sqrt[3]{\frac{27}{2} Ab_n^2 - a_{1n}^3 + \frac{9}{2\sqrt{3}} b_n \sqrt{27A^2 b_n^2 - 4a_{1n}^3 A} +} \right. \\ \left. + \sqrt[3]{\frac{27}{2} Ab_n^2 - a_{1n}^3 - \frac{9}{2\sqrt{3}} b_n \sqrt{27A^2 b_n^2 - 4a_{1n}^3 A - a_{1n}}} \right], \quad (9)$$

l_q – сумарний радіальний розмір ізоляції у “вікні”; $b_n = \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{C_{11}}{l_{\phi 1} \phi_{k1} k_{11}} + \frac{C_{n1}}{l_{\phi 1} \phi_{kn} k_{n1}} \right) \right]$,

$a_{1n} = \sum_{i=1}^{n-1} a_{i(i+1)} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n b_{qi}$, $A = \frac{S_n U_{s1n} \epsilon_m q_o N_{\Delta} l_{c1}^2}{7,92 m^2 f_{e1n} j_{\Delta}^2 K_R P_{k\Delta} k_{\phi} \phi_K^2}$ – параметричні коефіцієнти; C_{11} ,

C_{n1} , k_{i1} , k_{n1} – коефіцієнти відносних потужностей та співвідношення густини струмів обмоток; $l_{\phi 1}$ – узагальнений параметричний коефіцієнт, який враховує суму відносних потужностей обмоток, їх густину струмів і заповнення поперечного перерізу обмоток у “вікні” трансформатора провідниковим матеріалом; l_{n1} – узагальнений параметричний коефіцієнт, який враховує суму відносних потужностей обмоток і їх густини струмів; ϕ_K – коефіцієнт заповнення площі

поперечного перерізу “вікна” МС провідниковим матеріалом реальних обмоток; $a_{i(i+1)}$ – ізоляційний проміжок між i -ою і $(i+1)$ обмотками; b_{qi} – ширина вертикального охолоджуючого каналу між концентрами i -ої обмотки; S_n , U_{sln} , q_o , $P_{кз}$ – номінальна потужність, напруга розсіювання, теплове навантаження та основні втрати в обмотках трансформатора; m – число фаз; K_R , k_o – коефіцієнт Роговського та середній коефіцієнт додаткових втрат від вихрових і циркулюючих струмів в обмотках; j_s – густина струму еквівалентної обмотки; N_s – число ефективних поверхонь охолодження концентрів обмоток; ϵ_{ln} , ϵ_m – коефіцієнти пропорційності між L , середньою довжиною витка еквівалентної обмотки та середньою довжиною каналу розсіювання.

Висота “вікна” МС

$$H = H_o + l_o, \quad (10)$$

де H_o – висота обмоток у “вікні”, яка дорівнює

$$H_o = \frac{7,92 I_{\phi_i} w_i^2 \epsilon_{ln} \psi t_m (1 + \alpha) (a_{1n} + F_o b_n) K_R f}{U_{\phi_i} U_{sln}}, \quad (11)$$

l_o – сумарний розмір ізоляції від торців обмоток до ярем;

I_{ϕ_i} , U_{ϕ_i} , w_i – фазний струм, напруга та число витків i -ої обмотки.

Повна маса сталі МС трансформатора дорівнює сумі мас всіх ділянок магнітного ланцюга

$$G_{mc} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^z G_{ij} = \gamma_c \phi_o S_{cm} (n_{cm} H + n_y k_y F + n_y t_m), \quad (12)$$

де G_{ij} – маса j -ої ділянки i -го виду в МС; z – число однотипних елементів даного виду в МС (стрижнів n_{cm} , ярем n_y , кутів n_y); p – число видів типових елементів МС; ϕ_o – коефіцієнт заповнення активною сталлю площі поперечного перерізу стрижня; k_y – коефіцієнт підсилення перерізу ярма.

Маса провідникового матеріалу обмоток дорівнює

$$G_{обмз} = \sum_{i=1}^n G_{обм_i} = n_{cm} \sum_{i=1}^n \gamma_{обм_i} s_i w_i L_{\epsilon i} = n_{cm} \gamma_{обм_z} s_z w_z L_{\epsilon z} = n_{cm} \gamma_{обм_z} \phi_k H_o F_o L_{\epsilon z}, \quad (13)$$

де $\gamma_{обм_i}$, $\gamma_{обм_z}$, s_i , s_z , $L_{\epsilon i}$, $L_{\epsilon z}$ – густина провідникового матеріалу, площі поперечного перерізу та середні довжини витка i -ої і еквівалентної обмоток.

Середня довжина витка еквівалентної обмотки дорівнює

$$L_{\epsilon z} = \frac{1}{l_{n1}} \sum_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} L_{\epsilon i} = \frac{\psi'}{l_{n1}} \left[(t_m + t_m \alpha) \left(\frac{C_{11}}{k_{11}} + \frac{C_{11}}{k_{11}} \cdot \frac{C_{21}}{k_{21}} + \dots + \prod_{i=1}^{n-1} \frac{C_{i1}}{k_{i1}} + \prod_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \right) + \right. \\ \left. 4 \sum_{i=1}^n a_{(i-1)i} \left(\frac{C_{i1}}{k_{i1}} + \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \cdot \frac{C_{(i+1)1}}{k_{(i+1)1}} + \dots + \prod_{i=1}^{n-1} \frac{C_{i1}}{k_{i1}} + \prod_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \right) + 2 \sum_{i=1}^n \Delta_i \left(\frac{C_{i1}}{k_{i1}} + \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \cdot \frac{C_{(i+1)1}}{k_{(i+1)1}} + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots + \prod_{i=1}^{n-1} \frac{C_{i1}}{k_{i1}} + \prod_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \right) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \Delta_i \left(\frac{C_{(i+1)1}}{k_{(i+1)1}} + \frac{C_{(i+1)1}}{k_{(i+1)1}} \cdot \frac{C_{(i+2)1}}{k_{(i+2)1}} + \dots + \prod_{i=1}^{n-1} \frac{C_{i1}}{k_{i1}} \right) \right]. \quad (14)$$

Втрати в МС трансформатора розраховуються як сума втрат у всіх елементах МС

$$P_o = \sum_{j=1}^p \sum_{z=1}^r P_{ojz} = (G_{cm} + G_y) \alpha_{mc} p_{cm} + G_y \alpha_{my} p_y, \quad (15)$$

де p – кількість різновидів типових магнітопровідних елементів МС; r – число однотипних елементів даного виду (стрижнів, ярем, кутів, стиків); P_{ojz} – втрати у z -ому типовому елементі j -го виду; p_{cm} , p_y – питомі втрати в елементах МС; α_{mc} , α_{my} – коефіцієнти, які враховують збільшення втрат в елементах МС за рахунок конструктивних особливостей МС і технологічних факторів.

Основні втрати в обмотках трансформатора при заданому режимі навантаження можна виразити через основні параметри магнітної системи і кожної з обмоток з урахуванням їх струмів навантаження

$$P_{кз} = \sum_{i=1}^n P_{ki} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_\theta}{\gamma_{обм}} \beta_i^2 j_i^2 G_{обми} = \frac{\rho_\theta}{\gamma_{обм}} \frac{S_n n_{cm} \gamma_{обм} j_\Delta l_{c1} \sigma_m \psi (1 + \alpha)}{4,44 m f \phi_o B \Delta t_m} \sum_{i=1}^n \beta_i^2, \quad (16)$$

де $\beta_i = S_i / S_n$ – коефіцієнт навантаження i -ої обмотки; S_i – потужність i -ої обмотки; ρ_θ – питомий електричний опір матеріалу обмоток при розрахунковій температурі θ .

Середнє питома теплове навантаження обмоток трансформатора

$$q_o = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ki} k_{oi}}{\sum_{i=1}^n S_i^{охл}} = \frac{P_{кз} k_o}{H_o L_{63} N_o}, \quad (17)$$

де k_{oi} – середній коефіцієнт додаткових втрат від вихрових і циркулюючих струмів в обмотках; $S_i^{охл}$ – площа ефективних поверхонь охолодження i -ої обмотки.

Запропоновані ММ забезпечують контроль і корегування рівня нагріву обмоток для заданого класу нагрівостійкості їх ізоляції за рахунок дотримання необхідного рівня питомих теплових навантажень q_{om} .

При оптимізації запроєктованих трансформаторів використовується економічний критерій – повна капіталізована вартість C_k . Як НКЗ в критерії C_k були обрані наступні: індукція в стрижні МС B_{cm} , відношення втрат короткого замикання до втрат холостого ходу ξ і відношення вартості системи обмоток трансформатора до вартості його МС x , які дорівнюють

$$\xi = \frac{P_{кз}}{P_o}, \quad (18)$$

$$x = \frac{c_o G_{обм_o}}{G_{mc}}, \quad (19)$$

де c_o – співвідношення вартості 1 кг обмотки до вартості 1 кг МС.

Критерій, як функцію НКЗ, можна виразити залежністю

$$C_k = K_m K_{np.p} (1+x) \frac{10S_n u_a}{\alpha_o \xi} + k_{xx} \frac{10S_n u_a}{\xi} + k_{kз} \xi \frac{10S_n u_a \gamma_{обм} c_o \alpha_o}{x \rho_{\theta} j_{\theta}^2}, \quad (20)$$

$$\text{або } C_k = \frac{K_m K_{np.p} (1+x) 10S_{ном} u_a}{\alpha_o \xi} + \frac{10S_{ном} u_a x j^2 \rho}{\xi^2 \gamma c_o \alpha_o} k_{xx} + \frac{10S_{ном} u_a \gamma c_o \alpha_o \xi}{\rho j^2 x} k_{kз}, \quad (21)$$

де K_m – коефіцієнт, що враховує вартість монтажу і наладки трансформатора на місці установки; $K_{np.p}$ – коефіцієнт, що враховує вартість профілактичних робіт і обслуговування за весь термін експлуатації трансформатора; u_a – активна складова напруги короткого замикання.

Критерій C_k – унімодальна функція, яка має чітко представлений мінімум, тобто вона монотонна в обидві сторони від точки мінімуму. Функції $C_k = f(\xi, x)$ мають мінімуми по змінним ξ і x . З цієї умови випливає, що мінімуму C_k відповідають оптимальні значення ξ_o і x_o , які приблизно визначаються за допомогою наступних виразів

$$\xi_o = \sqrt{\frac{(K_m K_{np.p} (1+x) + k_{xx} \alpha_o) \rho_{\theta} j_{\theta}^2 x}{k_{kз} \gamma_{обм} c_o \alpha_o^2}}, \quad (22)$$

$$x_o = \sqrt{\frac{k_{kз} \gamma_{обм}^2 c_o^2 \alpha_o^2 \xi^3}{K_m K_{np.p} \gamma_{обм} c_o \xi \rho_{\theta} j_{\theta}^2 + k_{xx} \rho_{\theta}^2 j_{\theta}^4}}. \quad (23)$$

Ряд цін і вартісних коефіцієнтів на етапі дослідницького проектування можуть бути оцінені лише приблизно, тому запропоновані співвідношення дозволяють при пошуку оптимального варіанту, на початковому етапі, знайти варіант близький до оптимального, тобто варіант, який знаходиться в зоні оптимальності.

Отримані на основі агрегованих НКЗ узагальнені проектні ММ по своїй структурі є позіномами і забезпечують можливість проектного синтезу, аналізу і оптимізації трансформаторів з різною кількістю та розташуванням обмоток, матеріалом обмоткового проводу, конструктивним виконанням МС і робочої частоти.

У третьому розділі виконано комплекс розрахункових проектних досліджень трансформаторів, які виготовлені із традиційних активних матеріалів та різним сполученням чинників, що забезпечують зниження ресурсозатрат і втрат енергії. Досліджені особливості впливу робочої частоти (у діапазоні 50-500 Гц), марки і товщини ЕТС (звичайної, покращеної і аморфної), а також матеріалу обмоткового проводу (міді, алюмінію) на параметри трансформаторів. Визначені варіанти з оптимальним (економічно обґрунтованим) поєднанням цих чинників.

При вирішенні завдань оптимального проектування і проектних досліджень використовувалась підсистема автоматизованого синтезу силових трансформаторів “Аметист”, розроблена в Одеському національному політехнічному університеті, яка легко доповнюється модулями нових конструктивних видів МС і обмоток трансформаторів, а також програмний комплекс Маhtcad. Для вирішення оптимізаційних задач проектних досліджень був обраний метод циклічного покоординатного спуску.

Дослідження виконані для серії трифазних силових трансформаторів класу напруги 6-10 кВ в діапазоні потужностей 63-630 кВА. Дослідження змін масовартісних показників силових трансформаторів виконувалися на прикладі трансформаторів потужністю 400/10 з МС із різних ЕТС і обмотками з традиційних провідникових матеріалів, при зміні робочої частоти в діапазоні 50-500 Гц. Як базові прийняті техніко-економічні параметри оптимального варіанта трансформатора ТМ400/10 з плоскою шихтованою МС, виготовленою з ЕТС марки 3407 товщиною 0,35 мм, циліндричними шаровими обмотками з алюмінієвого проводу і робочою частотою 50 Гц. Результати проектних досліджень представлені на рис. 1, 2.

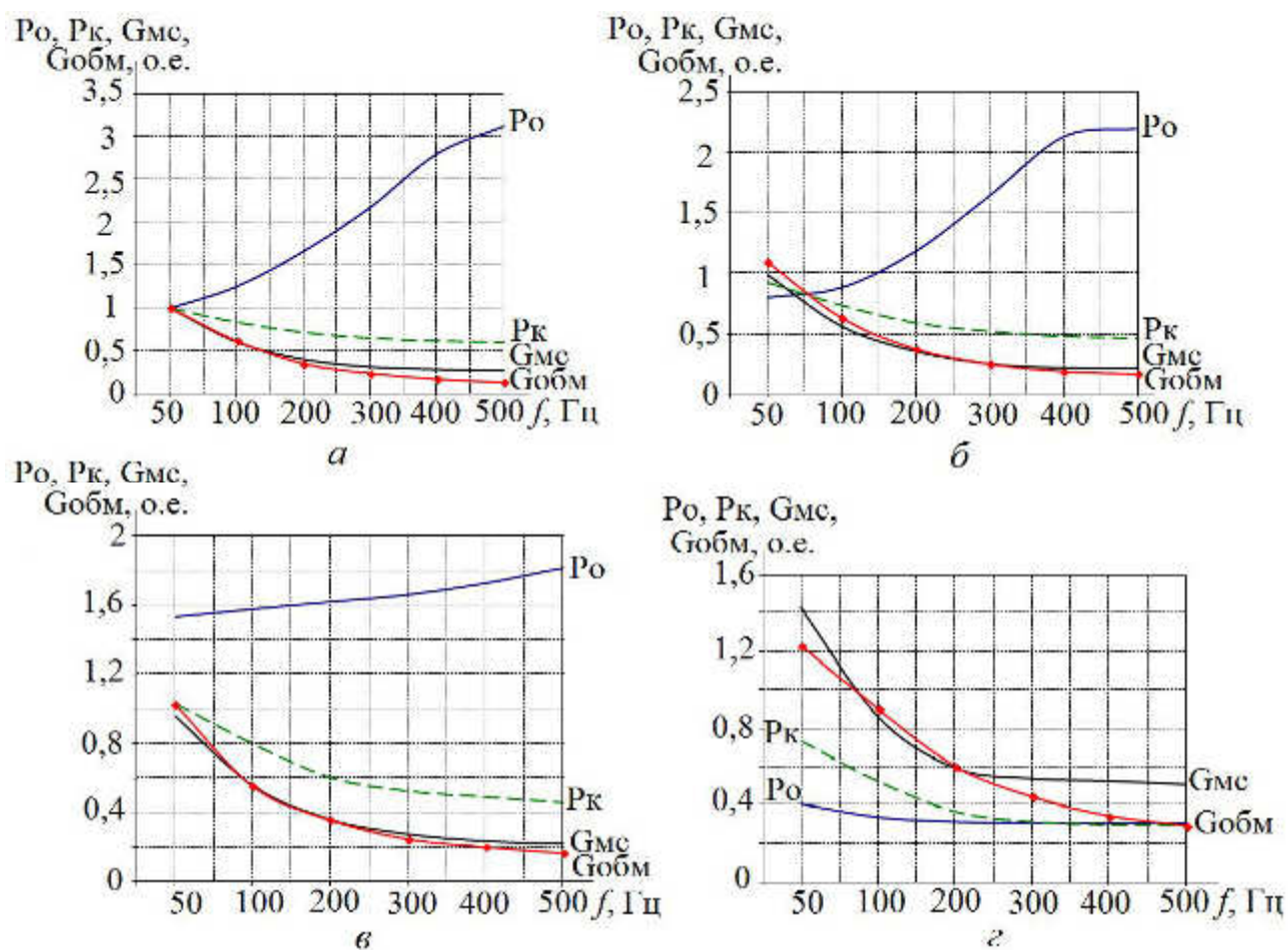


Рисунок 1. – Залежності відносних значень P_o , P_k , G_{mc} , $G_{обм}$ оптимальних варіантів трансформатора ТМ400/10 з МС із різних ЕТС і обмотками з алюмінієвого проводу від робочої частоти: *a* – 3407 товщина 0,35 мм; *б* – М120-23S товщина 0,23 мм; *в* – 3425 товщина 0,05 мм; *г* – 2НСР товщина 0,025 мм

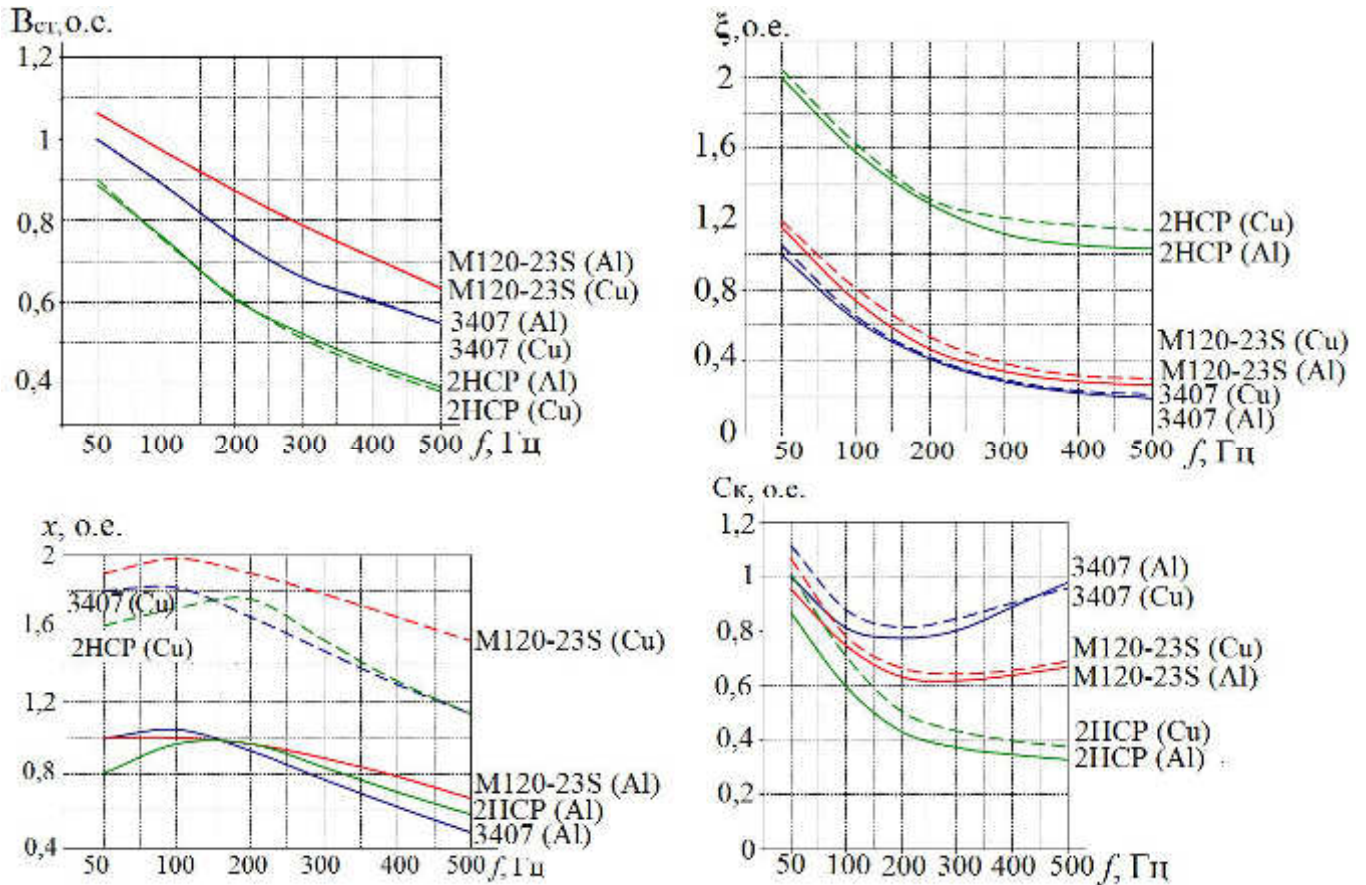


Рисунок 2 – Відносні значення оптимальних по C_k керованих змінних B_{cm} , ξ та x для трансформаторів ТМ400/10 з МС із різних ЕТС і обмотками із традиційних провідникових матеріалів в залежності від частоти

Аналіз отриманих залежностей оптимізованих варіантів трансформаторів з різними робочими частотами, МС яких виготовлена з ЕТС марки 3407, а обмотки з алюмінієвого обмоткового проводу, при підвищених робочих частотах показує, що оптимальною по критерію повної капіталізованої вартості є частота в діапазоні 150-200 Гц. У оптимального варіанта з робочою частотою 200 Гц сумарна маса активних матеріалів зменшується на 62%, сумарні втрати на 12 %, а вартість на 23% у порівнянні з базовим. Використання вдосконалених ЕТС (М120-23S) для трансформаторів з алюмінієвими обмотками і робочою частотою 50 Гц забезпечує збільшення оптимальної індукції в стрижні на 5 % у порівнянні з базовим варіантом, зниження сумарних втрат на 10 %, вартості на 5 %, при незмінній масі активних матеріалів. Для даної ЕТС оптимальним є діапазон частот 200-300 Гц. У оптимального варіанта трансформатора з частотою 300 Гц сумарні втрати знижені на 28%, сумарна маса активних матеріалів на 75%, а вартість на 38% у порівнянні з базовим.

Використання ЕТС з аморфних сплавів для МС трансформаторів з алюмінієвими обмотками і робочою частотою 50 Гц дозволяє знизити сумарні втрати на 32%, капіталізовану вартість на 13%, проте призводить до збільшення сумарної маси активних матеріалів на 40 % і зменшення індукції в стрижні на 11% в порівнянні з базовим варіантом, тому використання аморфної сталі на частоті 50 Гц

не є доцільним. Оптимальною ж є частота, що перевищує 500 Гц. Проте при робочій частоті, яка дорівнює 500 Гц, сумарні втрати зменшуються на 70%, сумарна маса активних матеріалів на 54%, а вартість на 67% у порівнянні з базовим варіантом.

Таким чином, з урахуванням економічної ефективності для виготовлення МС трансформаторів з робочою частотою 400 Гц і вище, доцільно використовувати тонколистіві ЕТС і ЕТС з аморфних сплавів, що дозволяє значно зменшити габарити МС і вартість трансформатора.

Використання мідного обмоткового проводу для трансформатора з МС із ЕТС 3407 товщиною 0,35 мм і робочою частотою 50 Гц призводить до збільшення сумарної маси активних матеріалів на 4%, вартості на 10% при незмінних сумарних втратах у порівнянні з базовим варіантом. Для трансформаторів з МС із ЕТС марки М120-23S товщиною 0,23 мм при частоті 50 Гц спостерігається зниження сумарних втрат на 15%, при збільшенні маси активних матеріалів на 13%, а вартості на 7% у порівнянні з базовим варіантом. В трансформаторах з МС із аморфної ЕТС 2НСР при робочій частоті 50 Гц забезпечується зниження сумарних втрат на 32%, при збільшенні маси активних матеріалів на 45%, а вартості на 1% у порівнянні з базовим.

При використанні мідного обмоткового проводу для трансформаторів, МС яких виготовлена з ЕТС марки 3407, оптимальна по критерію капіталізованих витрат частота знаходиться в діапазоні 200-250 Гц. В оптимальному варіанті з робочою частотою 250 Гц сумарна маса активних матеріалів зменшується на 65%, сумарні втрати на 13 %, вартість на 17% у порівнянні з базовим. Для трансформаторів з МС із ЕТС марки М120-23S, оптимальна частота дорівнює 350 Гц. В оптимальному варіанті трансформатора з цією частотою сумарні втрати знижені на 29%, сумарна маса активних матеріалів на 76%, а вартість на 35% у порівнянні з базовим. Для трансформаторів з МС із аморфної ЕТС 2НСР на частоті 500 Гц спостерігається зниження сумарних втрат на 95%, сумарної маси активних матеріалів на 78%, вартості на 58% у порівнянні з базовим варіантом. З отриманих залежностей також впливає, що використання мідного проводу для обмоток трансформатора зміщує діапазон оптимальної частоти в сторону збільшення на 20-25%.

Залежності, які характеризують вплив якості ЕТС і робочої частоти на оптимальні значення НКЗ мають монотонно-убуваючий характер. Для розглянутих ЕТС оптимальні значення B_{cm} змінюються в межах 1,65...0,61 Тл, x – 0,62...0,3, а ξ – 9,5...1,1. Залежності оптимальних значень індукції від частоти для мідної і алюмінієвої обмотки збігаються у всьому діапазоні частот, оптимальні значення ξ відрізняються частково (для міді на 0,05% більше, ніж для алюмінію), оптимальні значення x для алюмінієвої обмотки на 80% менші, ніж для мідної. Оптимальні значення повної капіталізованої вартості трансформатора з мідними обмотками перевищують значення C_k алюмінієвих варіантів не більше ніж на 10% у всьому діапазоні частот.

В четвертому розділі наданий короткий огляд розвитку теорії надпровідності, розглянуті основні види надпровідникових матеріалів і описані їх властивості, представлені основні технічні характеристики трансформаторних пристроїв з використанням ВТНП обмоток, виконано аналіз можливих конструктивних рішень

компоновки МС і обмоток трансформаторів з ВТНП проводу, та оптимізація їх параметрів і порівняльний аналіз з трансформаторами, обмотки яких виготовлені із звичайних провідникових матеріалів.

Відповідно до програми проектних досліджень проаналізовано вплив робочої частоти на параметри трансформаторів з МС із різних ЕТС і обмотки з ВТНП проводу. Як об'єкт дослідження розглянуто трансформатор потужністю 400 кВА класу напруги 10кВ з ВТНП обмотками, розроблений в “теплому” виконанні. Для обмоток обраний ВТНП провід компанії American Superconductor Bi2223 в срібній матриці із співвідношенням сторін 4.1×0.31 , критичним струмом 135 А. Результати проектних досліджень представлені на рис. 3.

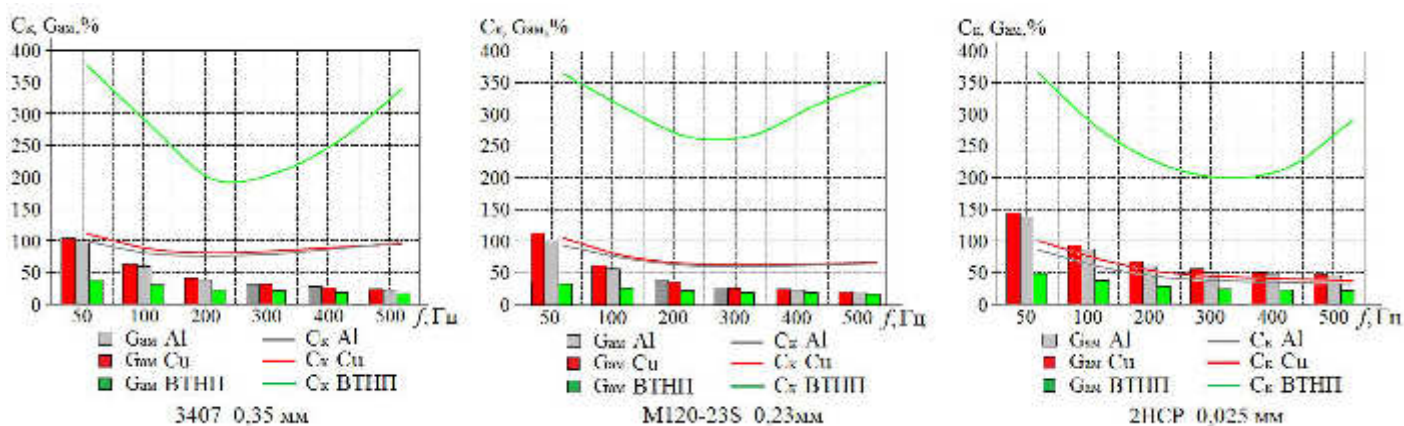


Рисунок 3. – Відносні значення мас активних матеріалів $G_{ам}$ і C_k оптимальних варіантів трансформаторів 400/10 з МС із різних ЕТС и обмотками із різних провідникових матеріалів при зміні робочої частоти

Також проведені дослідження впливу зміни номінальної потужності при зміні робочої частоти на питомі показники мас активних матеріалів трансформаторів із звичайними і ВТНП обмотками. Результати проектних досліджень представлені на рис. 4.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що при застосуванні підвищеної частоти і традиційних обмоткових проводів в трансформаторах з МС із різних ЕТС, оптимальним по критерію C_k є частотний діапазон у межах 150-300 Гц. Вживання ВТНП обмоткового проводу зміщує оптимальне значення частоти в діапазон 250-350 Гц, при цьому для трансформатора з МС із ЕТС марки 3407 товщиною 0,35 мм забезпечується зниження витрати активних матеріалів на 78%, сумарних втрат на 75%, але вартість зростає у 1,97 рази, а у трансформатора з МС із ЕТС марки M120-23S товщиною 0,23 мм витрата активних матеріалів знизилася на 82%, величина сумарних втрат на 73%, проте вартість зросла у 2,46 рази в порівнянні з базовим варіантом. Вживання ВТНП обмоткових проводів в трансформаторах з МС із аморфної сталі 2НСР при робочій частоті 350 Гц дозволяє знизити масу активної частини трансформатора на 76%, сумарні втрати на 95,5%, але вартість збільшується у 1,9 рази.

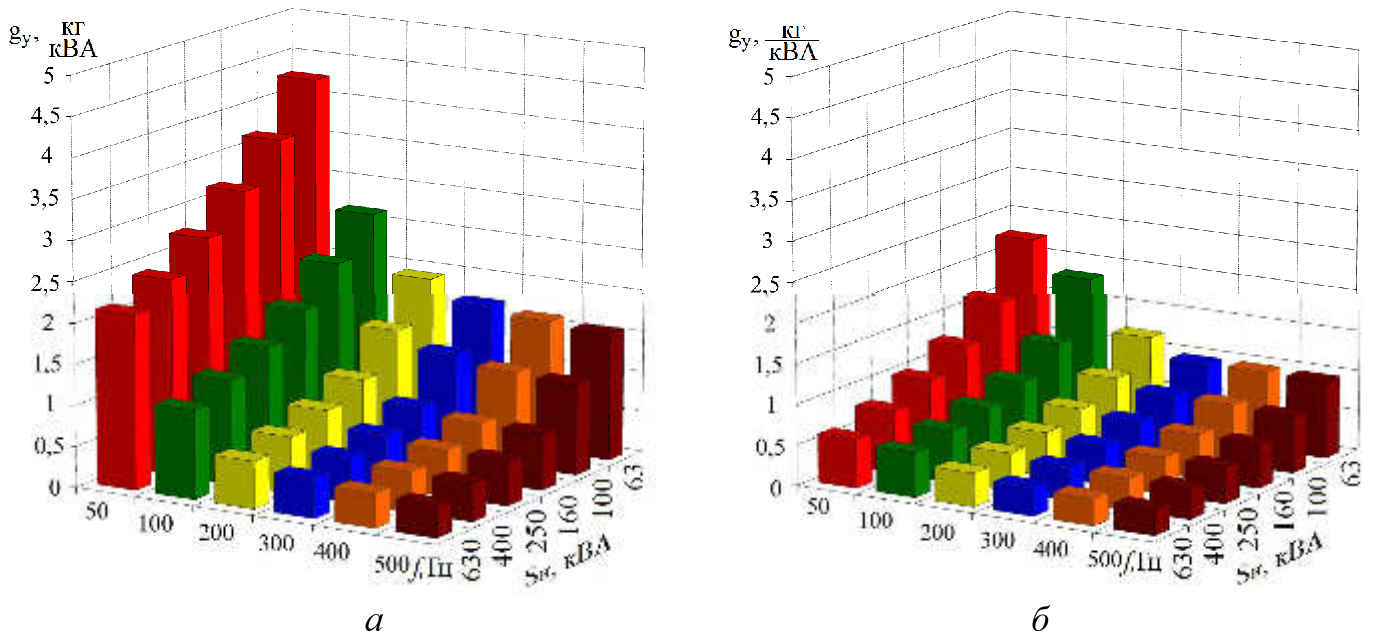


Рисунок 4. – Залежності питомих мас активних матеріалів g_y силових трансформаторів з алюмінієвими (а) та ВТНП (б) обмотками від робочої частоти та номінальної потужності

Таким чином, використання ВТНП обмоток і аморфної сталі для виготовлення МС трансформаторів з підвищеною частотою, дозволяє значно (у 3-5 разів) знизити витрати активних матеріалів, зменшити розміри трансформатора і є ефективним шляхом для зниження рівня втрат. Вживання ВТНП проводів також істотно підвищує екологічність трансформаторів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача розробки ресурсо- та енергоефективних трансформаторів на основі використання інноваційних технічних рішень, вдосконалення засобів їх математичного моделювання та автоматизованого проектування. Основні наукові і практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Розроблені нові ММ електромагнітних характеристик ЕТС, які дозволяють з необхідною точністю визначати питомі втрати і намагнічуючу потужність сучасних ЕТС в діапазоні частот 50-500 Гц, що істотно підвищує адекватність проектної ММ і результатів проектних досліджень.

2. Розроблені узагальнені проектні ММ силових трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками на основі агрегованих НКЗ, інваріантні до кількості концентрів обмоток і схем їх взаємного розміщення, конструктивного виконання МС, матеріалу обмоткового проводу, типу ЕТС і робочої частоти запроектованого трансформатора.

3. Розроблені ММ істотно спрощують структуру проектної ММ силового трансформатора, залежності між геометричними розмірами, його НКЗ і іншими параметрами, а також знижують розмірність оптимізаційної задачі.

4. Отримані аналітичні співвідношення, що забезпечують перехід від узагальнених показників оптимального варіанту до необхідного рівня деталізації конкретних параметрів його обмоток.

5. Інваріантність ММ до різних конструктивних виконань МС, робочої частоти і матеріалу обмоткового проводу забезпечується набором відповідних модулів конструктивних компонентів для множини можливих видів конструктивних елементів і критеріїв. Базисний набір модулів може розширюватися і доповнюватися по мірі вдосконалення електротехнічних матеріалів і конструктивних виконань компонентів трансформаторів.

6. Запропоновано ММ критерія повної капіталізованої вартості трансформатора.

7. Розроблені аналітичні співвідношення для оптимізації геометрії конструктивних елементів МС по критерію мінімуму витрат активних матеріалів.

8. Визначені економічно обґрунтовані значення оптимальної робочої частоти для трансформаторів з шаровими обмотками із традиційних провідникових матеріалів і ВТНП проводів.

9. Запропоновано методику, а також виконаний проектний синтез і порівняльний аналіз оптимальних трансформаторів з різною потужністю і частотою та обмотками із традиційних і ВТНП провідникових матеріалів.

10. Результати виконаних на основі створеного математичного забезпечення проектних досліджень з аналізу і оптимізації силових трансформаторів, свідчать про те, що найбільш доцільним для підвищення енерго- і ресурсоефективності енергетичних систем є створення і впровадження трансформаторів з МС із сучасних, перш за все аморфних, ЕТС і ВТНП обмотками в діапазоні підвищених робочих частот 250-350 Гц. Безперечною перевагою таких технічних рішень, окрім енерго- і ресурсоефективності, є їх екологічність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пуйло Г.В. Оптимальный проектный синтез трансформаторов с комбинацией обмоток из различных проводниковых материалов / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпана // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 16(92). – С. 59-64.

2. Пуйло Г.В. Эффективность применения обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью в силовых трансформаторах / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпана // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – №14(90). – С.43-52.

3. Пуйло Г.В. Математическое моделирование электромагнитных характеристик электротехнических сталей / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, Е.П. Насыпаная // Електротехніка і Електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 29-32.

4. Пуйло Г. В. Идентификация удельных потерь в электротехнической стали магнитных систем преобразователей электрической энергии при различных рабочих частотах / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпаная // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2011. – № 02(78). – С. 42-47.

5. Насыпаная Е.П. Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях / Е.П. Насыпаная // Тр. Одес. нац. политехн. ун.: Науч. и производственно-практический сб. по техн. и естествен. наукам. – 2010. – № 1. – С. 116-123
6. Чайковский В. П. Выбор начального уровня индукции в магнитных систем трансформаторов повышенной частоты / В.П. Чайковский, Е.П. Насыпаная, Ю.И.Доненко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – № 74. – С. 63-65.
7. Насыпаная Е. П. Изменение показателей трансформатора при повышении частоты / Е. П. Насыпаная // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – № 73. – С. 102-106.
8. Чайковский В. П. Позинормальная оптимизационная математическая модель трехобмоточного трансформатора и ее анализ / В.П. Чайковский, Е.П. Насыпаная, А.И. Мартынюк // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2008. – № 70. – С. 82-86.
9. Чайковский В. П. Оптимальные характеристики понижающих силовых трансформаторов / В. П. Чайковский, Е. П. Насыпаная, А. И. Мартынюк // Вісник Кременчуцького держ. політех. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2008. – Ч. 1, № 6. – С. 20-22.
10. Чайковский В. П. Определение потерь в стали трансформатора при различных частотах и несинусоидальности магнитного потока с учетом соотношения гистерезисных и вихревых потерь / В.П. Чайковский, Е.П. Насыпаная, А.И. Мартынюк // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2008. – № 71. – С. 61-63.
11. Чайковский В. П. Определение потерь в ярах пространственных магнитных систем при несинусоидальности магнитного потока / В.П. Чайковский, Е.П. Насыпаная, С.А. Игнатенко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2007. – № 69. – С. 46-49.
12. Чайковский В. П. Оптимальное значение плотности тока в обмотках трансформаторов 1-го и 2-го габаритов / В. П. Чайковский, В. А. Матухно, Е.П. Насыпаная // Збірник наукових праць. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 3. – С.142-168.
13. Насыпаная О.П. Дослідження позинормальних математичних моделей силових трансформаторів / О.П. Насыпаная // Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі: 39 наук.-практ. конф. молодих дослідників ОПУ-магістрів, 18-20 жовт. 2004 р.: тез. доп. – Одеса: ОНПУ, 2004. – С. 145.
14. Насыпаная О.П. Властивості оптимізаційної позинормальної математичної моделі силових трансформаторів / О.П. Насыпаная // Електротехніка і електромеханіка: міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспірантів, молодих вчених, 25-27 листоп. 2004 р. / Нац. ун-т. кораблебудування ім. адмірала Макарова. – М.: НКУ, 2004. – С. 11-13.
15. Nasypanaya E. Optimum project synthesis and analysis of high frequency transformers / E. Nasypanaya // Інтелект, Інтеграція, Надійність: сучасн. III міжнар. конф. студ. та молодих вчених, 19-21 квіт. 2010 р.: тез. доп. / М-во освіти і науки

України, Нац. техн. ун-т України “КПІ” –К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2010. – С. 42.

16. Nasypanaya E. Determination of the specific losses in steel of the high-frequency transformers for the optimization of induction level in their magnetic systems./ E. Nasypanaya // Интеллект, Интеграция, Надійність: сучасн. IV міжнар. конф. студ. та молодих вчених, 21-22 квіт. 2011 р.: тез. доп. / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України “КПІ” –К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2011. – С. 36-37.

17. Пуйло Г.В. Автоматизированный синтез математических моделей характеристик электротехнических стале / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, Е.П. Насыпаная // Електротехніка та комп'ютерні системи . – 2011. – № (03)79. – С. 305-306.

18. Насыпаная Е.П. Перспективы повышения ресурсо- и энергоэффективности силовых трансформаторов / Е.П. Насыпаная, Г.В. Пуйло // Сучасні інформаційні технології 2012: матеріали першої міжнар. конф. студ. і молодих науковців, 26-27 квіт. 2012 р.: тез. доп. / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, Издательство, 2012. – С. 148-150.

АНОТАЦІЯ

Насыпана О. П. Моделювання і проектний синтез енергоефективних трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015 р.

В дисертаційній роботі розглянуті шляхи підвищення ресурсо- і енергоефективності силових трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками на основі раціонального поєднання ряду інноваційних технічних рішень. Розроблені математичні моделі (ММ) і методика визначення електромагнітних параметрів електротехнічних стале (ЕТС) при різних частотах. Розроблені узагальнені ММ для проектного синтезу і оптимізації трансформаторів з циліндровими шаровими обмотками, інваріантні до кількості обмоток і схем їх розміщення, матеріалу обмоткового проводу, конструктивного виконання магнітної системи (МС) і робочої частоти досліджуваного трансформатора.

При розробці ММ як основні керовані змінні були обрані змінні, що характеризують техніко-економічні показники трансформатора – співвідношення втрат короткого замикання до втрат холостого ходу, співвідношення вартостей обмоток до вартості магнітної системи, а також індукція в стрижні і частота. Як основний критерій оптимізації прийнятий критерій повної капіталізованої вартості. При вирішенні задач оптимального проектування і проектних досліджень використовувалась підсистема автоматизованого синтезу силових трансформаторів “Аметист”, розроблена в Одеському національному політехнічному університеті. Процес параметричної оптимізації реалізований методом циклічного покоординатного спуску.

Виконано проектний синтез силових трансформаторів стандартної і підвищеної частоти, МС яких виготовлені з різних ЕТС, а обмотки з традиційних провідникових матеріалів і з високотемпературних надпровідників (ВТНП). Дослідження виконані для серії трифазних силових трансформаторів класу напруги 6-10 кВ в діапазоні потужностей 63-630 кВА. Аналіз ефективності засобів вдосконалення трансформаторів виконаний на основі вирішення задач їх структурно-параметричної оптимізації.

Розроблені рекомендації з оптимальних значень підвищених частот для трансформаторів з МС із різних ЕТС і обмотками з традиційних провідникових матеріалів. Запропоновані економічно обґрунтовані значення оптимальної робочої частоти для трансформаторів з ВТНП обмотками.

Ключові слова: електротехнічна сталь, питомі втрати, силовий трансформатор, математична модель, магнітна система, шарові обмотки, обмотковий провід, високотемпературна надпровідність, проектний синтез, оптимізація.

АННОТАЦИЯ

Насыпаная Е. П. Моделирование и проектный синтез энергоэффективных трансформаторов с цилиндрическими слоевыми обмотками. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2015 г.

В диссертационной работе рассмотрены пути повышения ресурсо- и энергоэффективности силовых трансформаторов с цилиндрическими слоевыми обмотками на основе рационального сочетания ряда инновационных технических решений. Разработаны математические модели (ММ) и методика определения электромагнитных параметров электротехнических сталей (ЭТС) при различных частотах. Разработаны обобщенные ММ для проектного синтеза и оптимизации трансформаторов с цилиндрическими слоевыми обмотками, инвариантные к числу обмоток, материалу обмоточного провода, конструктивному исполнению магнитной системы (МС) и рабочей частоте исследуемого трансформатора. Компоненты проектной ММ выражены как функции – позиномы, поскольку естественная форма большинства функций, которые описывают компоненты трансформатора, является позиномиальной. Другие элементы ММ также могут быть преобразованы в позиномы. ММ обеспечивают адекватное и компактное описание компонент объекта проектирования, которое на последующих этапах проектного синтеза может быть развернуто до любого необходимого уровня детализации и одновременно обеспечивает унификацию алгоритмов и программного обеспечения проектного синтеза.

При разработке ММ в качестве основных управляемых переменных выбраны переменные, характеризующие технико-экономические показатели трансформатора – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода, отношение стоимостей обмоток к стоимости магнитной системы, а также индукция в стержне и рабочая частота. В качестве основного критерия оптимизации принят критерий

полной капитализированной стоимости, математическое описание которого является строго выпуклой позиномиальной функцией. Поэтому оптимизация выполняется автоматически методом циклического покоординатного спуска с выдачей информации об оптимальных значениях агрегированных УП, о ходе процесса поиска, о числе обращений к ММ. При решении задач оптимального проектирования и проектных исследований использовалась подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов “Аметист”, разработанная в Одесском национальном политехническом университете.

Выполнен проектный синтез силовых трансформаторов стандартной и повышенной частоты, МС которых изготовлены из различных ЭТС, а обмотки из традиционных и высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) обмоточных материалов. Исследования выполнены для серии трехфазных силовых трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ в диапазоне мощностей 63-630 кВА. Анализ эффективности средств совершенствования трансформаторов выполнен на основе решения задач их структурно-параметрической оптимизации.

Разработаны рекомендации по оптимальным значениям повышенных частот для трансформаторов с МС из различных ЭТС и обмотками из традиционных проводниковых материалов. Предложены экономически обоснованные значения оптимальной рабочей частоты для трансформаторов с ВТСП обмотками.

Результаты выполненных на основе созданного математического обеспечения проектных исследований по анализу и оптимизации силовых трансформаторов, свидетельствуют о том, что наиболее целесообразным для повышения энерго- и ресурсоэффективности энергетических систем является создание и внедрение трансформаторов с МС из современных, прежде всего аморфных, ЭТС и ВТСП обмотками в диапазоне повышенных рабочих частот 250-350 Гц. Несомненным достоинством таких технических решений, помимо высоких ресурсо-энергетических показателей, является их экологичность.

Полученные научные результаты использованы в учебном процессе кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета при выполнении курсового, дипломного проектирования и в лекционных курсах.

Ключевые слова: электротехническая сталь, удельные потери, силовой трансформатор, математическая модель, магнитная система, слоевые обмотки, обмоточный провод, высокотемпературная сверхпроводимость, проектный синтез, оптимизация.

ABSTRACT

Nasypanaya E. P. Design and project synthesis of energyeffective transformers with cylindrical stratified windings. – *Manuscript copyright.*

The thesis for PhD degree in technical sciences on the speciality 05.09.01 – electric machines and apparatus. – Odesa national polytechnic university, Odesa, 2015.

The ways of power transformers with cylindrical layered windings resources and energy efficiency increase on the basis of a combination of some innovation technical solutions were considered in a dissertation work. The mathematical models and

methodology of electrotechnical steels electromagnetic parameters determination at different frequencies were worked out. The summarize mathematical models for a project synthesis and optimizations of transformers with cylindrical layered windings, which invariant to the number of windings, material of winding wire, to the magnetic system structural execution and working frequency of the investigated transformer were worked out.

At development of mathematical models as the basic guided variables, which characterize technical and economic parameters of transformer were chosen such as relation of short circuit losses toward the idling losses, relation of windings costs toward the magnetic system cost, and also induction in a bar and frequency. The criterion of the complete capitalized value was accepted as a basic optimization criterion. The subsystem "Amethyst" of the power transformers automated synthesis, which worked out in Odessa national polytechnic university, was used for the decision of the optimal planning and project researches tasks. The process of parameter optimization is realized by the method of the successive displacement method.

The project synthesis of the standard and high frequency power transformers with magnetic system from different electrotechnical steels and windings from traditional and high temperature superconductors puttees materials was executed. Researches for the series of three-phase power transformers with class of tension 6-10 kV in the range of 63-630 kVA powers were executed. The analysis of transformers perfection facilities efficiency was executed on the basis of the tasks decision their structural and self-reactance optimization.

Recommendations on the optimal levels of high frequencies for transformers with magnetic system from different electrotechnical steels and windings from traditional explorer material were worked out. The economically reasonable ranges of optimal working frequency for transformers with HTSC windings were offer.

Keywords: electrotechnical steel, specific losses, power transformer, mathematical model, magnetic system, layered windings, winding wire, high temperature superconductivity, project synthesis, optimization.

Підписано до друку 28.07.2015.
Формат 60x90/16. Папір офсетн.
Гарнітура «Тайме». Друк цифровий. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам. № 20/07.

Надруковано з готового оригінал-макету у видавництві
Одеського регіонального інституту державного управління
Національної академії державного управління при Президентові України

Свідоцтво ДК №1434
від 17 липня 2003 р.
65009, м. Одеса, вул. Генуезька, 22.
т. 729-76-48, 729-76-49.
www.oridu.odessa.ua