

УДК 621.023.03

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ ПРИ РІЗКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

- ЗІНОВКІН В.В.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: znvvv@ukr.net;
- БЛИЗНЯКОВ О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- КРИСАН Ю. О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: krisan@mail.com;
- ЗАЛУЖНИЙ М.Ю.** ст. викладач кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: zaluzhnyi_m@ukr.net.

Мета роботи. Розробити і експериментально підтвердити методу фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в потужному силовому трансформаторі, що функціонує при різкозмінних навантаженнях, шляхом поєднання критеріїв подоби та коефіцієнтів еквівалентності.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувались теоретичні положення математичного та комп'ютерного моделювання, теоретичної електротехніки, а також теорія експерименту з застосуванням коефіцієнтів еквівалентності.

Отримані результати. Розроблені методи експериментального дослідження, які містять формування та реєстрацію сукупності зовнішніх та внутрішніх параметрів фізичних моделей, макетних зразків та реального обладнання. Отримано критерії подібності нестационарних електромагнітних процесів, що збуджуються різкозмінними полями розсіювання у силових трансформаторах спеціального призначення.

Наукова новизна. Подальшого розвитку отримала теорія та практика фізичного моделювання, а також теорія подібності нестационарних електромагнітних процесів у силових трансформаторах спеціального призначення, та формування сукупності характерних рис випробувальних режимів та їх реєстрації.

Практична цінність. Впровадження фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів на стадіях проектування та виготовлення силових трансформаторів для систем електропостачання дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів та ін., а також при модернізації силових трансформаторів загального призначення.

Ключові слова: фізичне моделювання; нестационарні електромагнітні процеси; трансформаторне обладнання; різкозмінні навантаження; надійність; аварійність; критерії подібності; коефіцієнт еквівалентності.

І. ВСТУП

Нестационарні електромагнітні процеси мають місце в електротехнічному обладнанні, яке працює в системах електропостачання енергоємних технологічних комплексів. Останні характеризуються різкозмінними електротехнологічними режимами, які у часі змінюються за імовірнісним законом і, в значній мірі, залежать від особливостей того чи іншого технологічного процесу [4], [6], [9], [10], [14], [15]. Проблема полягає в тому, що на стадії проектування електричного обладнання використовувались інженерні методики, які відповідають вимогам нормативно-технічної документації (технічних умов, державних та міжнародних стандартів) переважно для обладнання загального призначення. При цьому не враховувалось, що е-

лектродинамічні зусилля і додаткові втрати зростають до 53 і 42%, відповідно, у порівнянні з системами загального призначення. Це, звичайно, призводить до підвищення аварійності в енергоємних електротехнологічних комплексах (ЕТК). Так, наприклад, аварійність трансформаторного обладнання, що забезпечує живлення дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів, ліній і вставок постійного струму, сягає 60%. Отже, існує гостра необхідність дослідити вплив таких факторів на функціонування електричного обладнання, на їх основі, розробити інженерно-технічні рішення для зниження додаткових втрат, перегрівів та електродинамічних зусиль до нормованих рівнів, а також уникнення ферорезонансних явищ.

Коротко розглянемо основні показники електри-

чно навантаження трансформаторного обладнання, яке забезпечує живлення енергоємного сталеплавильного комплексу. Як приклад, на рисунках 1 та 2 надані осцилограми струмів в процесі технологічного короткого замикання у сталеплавильному комплексі у складі ДСП-100. Величини струмів надані кратністю по відношенні до номінального струму.

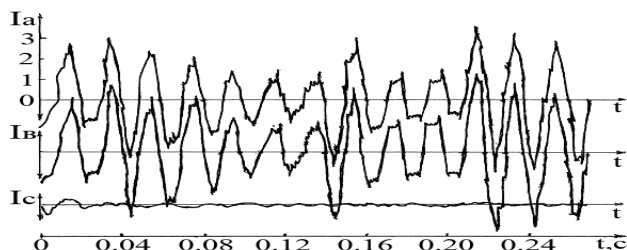


Рисунок 1. Осцилограми струмів на низькій стороні мережевого трансформатора типової потужності 160 МВА при роботі ЕТК у складі ДСП-100 в режимі двофазного технологічного короткого замикання

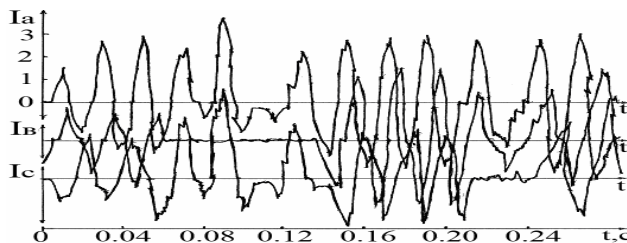


Рисунок 2. Осцилограми струмів на низькій стороні мережевого трансформатора типової потужності 160 МВА при роботі ЕТК у складі ДСП-100 в режимі почергових двофазних та трифазних технологічних коротких замикань

З рисунків 1 та 2 видно, що струми мають суттєво несинусоїдальний та несиметричний (до трифазної системи) характер. При цьому мають місце почергові трифазні та двофазні технологічні короткі замикання з відповідними перехідними процесами. Зокрема, на осцилограмі, яка надана на рис. 2, видно, що з початку має місце трифазне коротке замикання, потім між

фазами "А" і "С", потім – трифазне, потім між фазами "А" і "В", а в подальшому знов трифазне.

Такий характер навантаження трансформатора має місце протягом технологічної фази «розплав». Він в значній мірі залежить від якості скрапу, технологічних факторів, а також вибору режиму роботи лічного трансформатора. Останнє призводить до виникнення і розвитку нестационарних та несиметричних електродинамічних і електромагнітних явищ в обмотках, магнітній системі й конструкції у цілому. Очевидно, що у таких режимах деталі конструкції кожної з фаз функціонують в нерівнозначних електромагнітних та електродинамічних умовах, що є причиною часткового розпресування й усадки ізоляції з подальшою втратою електродинамічної стійкості обмоток [2]. Це є одним з численних факторів, що призводить до підвищення аварійності та зниження надійності трансформаторного обладнання.

Слід зазначити, що в таких режимах мають місце вищі гармонійні, пульсуючі і постійні складові, які впливають на електромагнітні процеси трансформатора: поверхневі втрати, електродинамічні, термічні і ферорезонансні явища, надмірне збудження в окремих стрижнях магнітопроводу, утворення зрівняльних струмів в деталях і вузлах устаткування, складним перехідним процесам в системах електропостачання, відхиленню струмів у суміжних розподільних мережах 10 кВ до 50% і т.д. З технологічної точки зору такі процеси обумовлені «обвалами» шихти, поломками і вигоранням електродів, обривами і замиканнями в коротких мережах, рухом розплавленого металу і шлаку, переміщеннями дуги при зміні напруженості магнітного поля [3], [4], [6], [9], [15], [18], [19].

Отже, різкозмінний характер навантаження викликає нестационарні електромагнітні процеси, які роблять експлуатацію електротехнічного обладнання, і особливо трансформаторів, більш жорсткою та скорочують термін їх служби. Як приклад, в табл. 1 надані систематизовані результати дослідження аварійності трансформаторного обладнання при різкозмінних навантаженнях.

Таблиця 1. Аварійність трансформаторного обладнання в результаті пошкодження активних і неактивних елементів конструкції

Елементи конструкції	Клас напруги, кВ													
	35		110		220		330		500		750		Всього	
	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
Обмотки	61	30	43	13	10	7	1	8	0	0	0	0	115	16
Пристрій РПН	4	2	61	18	26	19	1	8	5	24	0	0	97	13,5
Вводи	27	13	77	23	44	32	3	23	7	34	0	0	158	22
Інші вузли	81/31	40/15	126/31	37/9	55/1	41/1	8/0	61/0	9/0	42/0	0/0	0/0	279/0	39,5/9
Усього	204	100	338	100	136	100	13	100	21	100	0	0	712	100

Табл. 1 дає наглядну уяву про аварійність транс-

форматорного обладнання в мережах. Зокрема, найбільша аварійність має місце в системах електропоста-

чанья 35, 110 і 220 кВ, що пояснюється тим, що ці системи використовуються для живлення дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів, інших енергоємних промислових підприємств і установок з різкозмінним характером навантаження.

II. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Існуючі методи моделювання нестационарних електромагнітних процесів в елементах електротехнічного обладнання, збуджених різкомінними струмами, не дозволяють у повній мірі дослідити взаємозв'язок між електромагнітними полями розсіювання, додатковими втратами в деталях, електродинамічними зусиллями і іншими параметрами [1], [2], [5], [7], [11]–[15], [18], [19]. Для вирішення інженерних завдань на стадії проектування трансформаторного обладнання використовуються відповідні математичні та комп'ютерні моделі, напівпровідні та електролітичні ванни, відповідні керівні технічні матеріали та комбінаційні. Кожному з цих методів притаманні свої переваги і недоліки. Вони дозволяють встановити взаємні зв'язки між додатковими втратами по відомим епюрам розподілу полів розсіювання та іншими параметрами. При різкозмінних навантаженнях такі взаємозв'язки між окремими електромагнітними параметрами встановити неможливо внаслідок імовірнісної їх прояви. Тому для отримання достовірної інформації дослідження необхідно виконувати з урахуванням одночасної дії усіх факторів. Отже, найбільш повну та достовірну інформацію про хід нестационарних електромагнітних процесів і взаємних зв'язках між окремими параметрами можна отримати методом фізичного моделювання.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою цієї роботи є розробка та реалізація методики фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в електрообладнанні, які збуджуються різкозмінними електричними навантаженнями з використанням коефіцієнтів еквівалентності.

IV. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Фізичне моделювання доцільно використовувати при дослідженні електромагнітних процесів в електротехнічному обладнанні спеціального призначення. У даному випадку воно полягає в тому, що дослідження виконуються на зменшеній копії («фізичній моделі») електротехнічного обладнання спеціального призначення, що розробляється. При цьому її живлення здійснюється різкозмінними струмами, аналогічними за параметрами тим, що мають місце в реальному обладнанні («оригіналі») в процесі його експлуатації, а саме: ідентичний склад вищих гармонік, форма збуджуючого струму, а також їх діючі значення і частоти, які вибираються відповідно до визначальним критеріям подібності електромагнітних процесів. Живлення моделі здійснюється від спеціалізованого формувача різкозмінного навантаження і регульованої

частоти до 1000 Гц. [1]–[5]. Це дозволяє досліджувати нестационарні електромагнітні процеси при протіканні струму, який змінюється у часі за характерними ознаками реального електротехнологічного режиму. Результати досліджень, що отримані на фізичній моделі, приводяться до оригіналу на підставі критеріїв подібності відповідних параметрів. Збуджувальними є струми, що протікають в обмотках. Електромагнітне поле розсіювання пропорційне цим струмам. В якості початкових параметрів використовуємо напруженість магнітного поля розсіювання, яка розподіляється у фізичному об'ємі елементів електричного обладнання, включаючи неактивні деталі конструкції та допоміжні вузли. Напруженість магнітного поля розсіювання змінюється в часі по складному періодичному закону, який представимо в наступному вигляді:

$$H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) = H^{(m)}(\delta, t) \cdot m_{\omega}^{-1} \cdot k_{\text{ор}} = H_{\xi}(\delta, t) \cdot m_{\omega}^{-1} \quad (1)$$

В загальному випадку несинусоїдальне магнітне поле оригіналу може бути надано у наступному вигляді:

$$H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) = H_{\text{DC}}(\delta, t) + H_{\text{imp}}(\delta, t) + H_{\omega}(\delta, t) \quad (2)$$

де $H_{\text{DC}}(\delta, t)$, $H_{\text{imp}}(\delta, t)$ і $H_{\omega}(\delta, t)$ – миттєві значення складових напруженості магнітного поля: постійна, імпульсна та синусоїдальна, відповідно; δ – навантажувальний параметр, що визначає характер зміни поля; t – час; ω – кутова частота першої гармоніки; індекси «o» і «m» позначають приналежність поля оригіналу і моделі відповідно; $k_{\text{ор}}$ – коефіцієнт еквівалентності кутової частоти, що визначається за такою формулою [8]:

$$k_{\text{ор}} = \left(\sum_{v=1}^n v^{0,5} \cdot \gamma^2 \right)^{0,5}, \quad (3)$$

де v – порядковий номер гармоніки; γ – частковий внесок кожної гармоніки, що визначається за такою формулою:

$$\gamma = \frac{H_v}{H_{\Sigma}} \quad (4)$$

Формули (3) та (4) використовуються для визначення еквівалентної частоти:

$$\omega_{\text{екв}} = \omega_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ор}} \Big|_{H_{\text{досл}} = H_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

де $\omega_{\text{ном}}$ – номінальна кутова частота; $H_{\text{досл}}$ та $H_{\text{ном}}$ – напруженість магнітного поля у досліді та у номінальному режимі, відповідно.

Ідентичність протікання електромагнітних процесів в моделі і оригіналі забезпечується дотриманням рівнянь Максвелла. Перше рівняння Максвелла у даному випадку має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ &= \sigma H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) m_E^{-1} m_{\sigma} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ \text{або} &= \left(\sigma H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) m_E^{-1} m_H m_{\sigma} \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки неактивні деталі електроустаткування виготовлені з провідникових матеріалів (конструкційних сталей), то другим доданком в рівнянні в (6) нехтуємо. Для складної системи електротехнічного обладнання друге рівняння Максвелла можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ &= -\mu \frac{\partial H_{\xi}^{(m)}(\delta, t)}{\partial t^{(m)}} m_t m_H^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння (6) та (7) описують нестационарні процеси в моделі і оригіналі, а також відображають їх ідентичність і характер протікання в електротехнічному обладнанні.

У наданих рівняннях прийняті наступні позначення:

$$m_H = \frac{H^{(m)}(\delta, t)}{H^{(o)}(\delta, t)}; \quad m_E = \frac{E^{(m)}(\delta, t)}{E^{(o)}(\delta, t)} - \text{масштаб напруженості магнітного та електричного поля, відповідно;}$$

$$m_{\sigma} = \frac{\sigma^{(m)}}{\sigma^{(o)}}; \quad m_{\mu} = \frac{\mu^{(m)}}{\mu^{(o)}} - \text{масштаб електричної}$$

провідності та магнітної проникності неактивних елементів конструкції, відповідно;

$$m_{\omega} = \frac{\omega^{(m)}}{\omega^{(o)}}; \quad m_t = \frac{t^{(m)}}{t^{(o)}} - \text{масштаб кутової та ек-$$

вівалентної частоти, а також часу протікання електромагнітного процесу, відповідно.

У випадку, коли деталі конструкції моделі і оригіналу виготовлені з однакових матеріалів:

$$\mu^{(o)} = \mu^{(m)} = \text{const}, \quad \sigma^{(o)} = \sigma^{(m)} = \text{const}.$$

Для феромагнітних матеріалів необхідно враховувати нелінійність магнітної проникності [1, 2].

Виконавши відповідні перетворення, приходимо до критеріальним рівнянням подібності нестационарних електромагнітних процесів в моделі і оригіналі

$$\begin{aligned} (m_H m_E m_{\sigma}) m_{\omega} = 1 \\ (m_H m_E m_{\mu}) (m_{\omega} m_t) \end{aligned} \quad \text{або} \quad m_{\omega}^2 m_t^{-1} m_{\mu} m_{\sigma} = 1 \quad (8)$$

З визначального критерію подібності випливає, що при зменшенні фізичної моделі, частота струму збільшується згідно (8). При цьому слід зазначити, що

для фізичної моделі масштабна модель працює в області слабких магнітних полів, а в оригіналі – в області сильних. Це необхідно враховувати при приведенні результатів вимірювань на моделі до оригіналу [5].

Експериментальні дослідження виконувались на макетному зразку силового перетворювального трансформатора ОДЦНП-175000/±750. Вимірювання і реєстрація різкозмінних струмів та напруг здійснювалася відповідно до структурної схеми, яка надана на рис. 3.

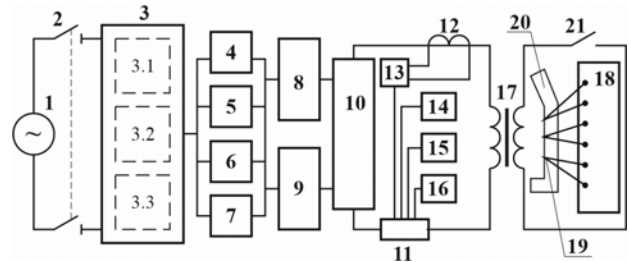


Рисунок 3. Структурна схема спеціалізованого стенду для формування різкозмінних збуджуючих параметрів і моделювання електромагнітних процесів фізичної моделі

На рис.3 прийнято наступні позначення: 1 – генератор змінного струму регульованої частоти 50–800 Гц; 2 – вимикач; 3 – моделюючий блок; 3.1, 3.2, 3.3 – формувачі збуджуючого струму; 4 – регулятор несиметрії струму; 5 – регулятор потужності; 6 – вимірник напруги; 7 – аналізатор спектра й частотних характеристик; 8 – регулятор активної складової потужності; 9 – регулятор реактивної потужності; 10 – регулятор узгодження випробувального режиму та реєстрації; 11 – безіндуктивний шунт; 12 – трансформатор струму з розширеним діапазоном частот; 13 – реєстратор форми струму; 14 – реєстратор спектру і частотних характеристик; 15 – реєстратор несиметрії; 16 – реєстратор шуму та його спектрального складу; 17 – фізична модель; 18 – пристрій для вимірювання місцевих втрат та теплового перевантаження деталей конструкції; 19 – термопари; 20 – деталь моделі, що досліджується; 21 – короткозамикач.

Короткозамикач призначений для подачі напруги поштовхом і його відключення.

При цьому використовувалося спеціалізоване устаткування, зокрема формувач різкозмінного навантаження, а також методика досліджень сукупності параметрів, що характеризує нестационарні електромагнітні процеси [4]. Характерною особливістю цього пристрою є можливість відтворити форму намагнічувального струму моделі такої, як в оригіналі. Частота першої гармоніки в моделі визначається по критерію подібності (5). Слід зазначити, що в разі, коли деталі конструкції моделі, що випробовуються, та оригіналу виготовлені з однакових матеріалів, то у першому наближенні можна скористатися наступною рівністю:

$$m_{\omega}^2 m_t^{-1} = 1$$

У нашому випадку частота першої гармоніки струму в моделі дорівнювала 800 Гц, а в оригіналі (силовому трансформаторі спеціального призначення) – 50 Гц.

Позитивною властивістю наданого спеціалізованого стенду є можливість використовувати коефіцієнти еквівалентності і одночасно вимірювати зовнішні збуджуючі (струм, напругу, частоту, потужність та їх складові) і електромагнітні (поверхневі втрати, нагрів, потоків розсіювання, зрівняльних потоків, електродинамічних зусиль) параметри елементів випробуваного обладнання. При цьому вимірюються місцеві перегріву в найбільш вразливих місцях неактивних деталей з метою дослідження найбільш навантажених ділянок і розробки методів їх зниження до величин нормованих державними стандартами.

Класифікація і автоматизований аналіз кратності й тривалості збуджуючих струмів здійснювався за допомогою спеціалізованого пристрою, структурна схема якого наведена на рис. 4.

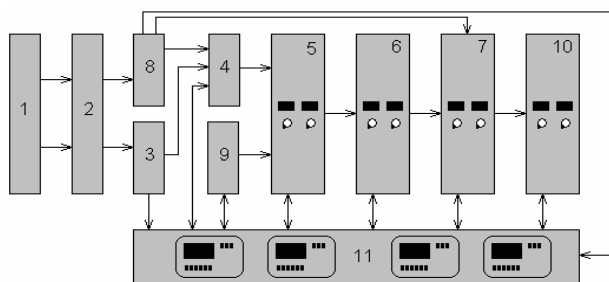


Рисунок 4. Структурна блок-схема спеціалізованого пристрою для вимірювання, реєстрації та класифікації різкозмінних струмів

На рис. 4 прийняті наступні позначення: 1 – вимірювальний трансформатор струму (при вимірюванні напруги використовується трансформатор напруги) з розширеним діапазоном частот або шунт чи інший прилад для вимірювання струму; 2 – перетворювач струму або піковий детектор; 3 – блок масштабування аналізованих сигналів, що перевищують припустимі нормативно-технічною документацією; 4 – аналогопорівняльний логічний блок; 5 – програмно-аналітичний блок; 6 – блок класифікації відповідно до кратності аналізованої інформації; 7 – блок класифікації по тривалості різкозмінних впливів; 8 – генератор тактових імпульсів; 9 – бібліотека нормованих сигналів відповідно до кратності, тривалості й кількості; 10 – блок зберігання логічної інформації; 11 – блок індикації й знімання обробленої інформації, включаючи сигналізацію й можливі пошкодження у пристрої.

Вимірювалися перегріву в найбільш характерних місцях та відповідних режимах для кожної деталі та вузла, що випробувались. Слід відзначити, що електромагнітне навантаження цих деталей та вузлів суттєво залежить від схеми з'єднання обмоток моделі. При

зміні схеми з'єднання обмоток суттєво змінюється епюри поля розсіювання в просторі моделі. Тому доцільно ретельно дослідити найбільш вразливі деталі з точки зору електромагнітного перевантаження і, в значній мірі, теплового. З цією метою використано модель трансформатора з магнітною системою на двох стрижнях. На кожному стрижні розташовано по чотири обмотки: низьковольтна (НН), вентиляльна (ВО), мережева (СО) і регульовальна (РО) в порядку геометричного розташування відносно стержнів як показано на рис.5а. Обмотки НН, СО і РО з'єднувались відповідно до схем, що надані на рис 5б, 5в та 5г, а вентиляльні обмотки працювали індивідуально відповідно до вимог технологічного навантаження.

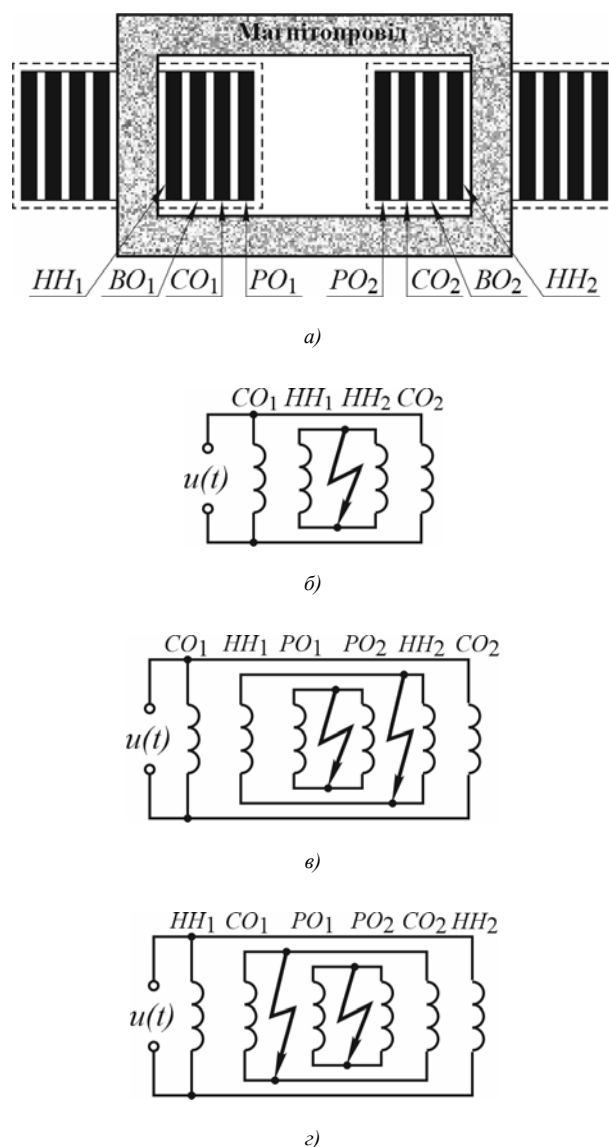


Рисунок 5. Розташування обмоток на стрижнях моделі (а) та схеми підключення обмоток (б), (в) і (г)

Випробування виконувалися на масштабній моделі, а потім порівнювалися з вимірними на реальному трансформаторі, який працював на промислово-

му підприємстві та випробовувався в умовах заводу-виробника. При цьому, живлення здійснювалося струмом, що змінюється в часі за синусоїдальним і несинусоїдальним законам. Гармонійний склад неси-

нусоїдального струму в дослідах витримувався однаковим. Отримані результати експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати моделювання додаткових втрат в неактивних деталях силового трансформатора спеціального призначення

Деталі	Модель		Оригінал		Підвищення втрат, в.о.
			Нагрів, °С		
	Режим	Втрати, Вт/м ²	Синусоїдальний	Несинусоїдальний (k _{в/г} = 14%)	
Бак	1	6,35	64,0	72,1	1,13* 1,16
	2	11,3	113,0	129,6	1,15* 1,16
Балка	3	10,8	108,0	180,6	1,66* 1,71
Стрижень	4	12,5	125,0	148,0	1,18* 1,21
Пакет	4	9,81	98,0	110,5	1,13* 1,15

Примітки: * – визначено по результатам експерименту

У режимі 1 випробування виконувалися при з'єднанні обмоток за схемою, що надана на рис. 5б при потужності 50 МВА. Випробування у режимі 2 виконувались за тією ж схемою, але при потужності 67 МВА. В обох випадках обмотка РО була закороченою; при цьому витримувались струми, що відповідали певному режиму короткого замикання. У випробувальних режимах 3 та 4 обмотки з'єднувалися за схемами, які надані на рис. 5в та 5г, відповідно. Після аналізу багаточисельних випробувань встановлено, що найбільш несприятливим є режим при прохідній потужності 67 МВА.

Як видно з результатів дослідження нагрів в неактивних деталях більше при різкозмінному навантаженні в баку на 12,6 і 14,7% в порівнянні з синусоїда-

льним струмом. При цьому, в стінці баку навпроти другого стрижня місцевий нагрів зменшується відносно обмоток першого і другого стрижнів. При різкозмінному струмі нагрів в обох випадках збільшився пропорційно. У пресувальній балці нагрів збільшився на 67,2%, а в стрижні і першому пакеті магнітної системи на 18,4% і 12,7%, відповідно. Це пояснюється перерозподілом зрівняльних потоків в магнітній системі викликаних несиметрією розподілу навантаження по стрижнях. Оскільки в окремих деталях перегрів перевищував нормовані величини, то подальші дослідження виконувалися з метою пошуку рішень їх зниження при збереженні механічної міцності. Результати таких досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Результати експериментальних досліджень методів зниження додаткових втрат в неактивних деталях

Досліджувана модель	Засоби зі зниження додаткових втрат	Додаткові втрати, Вт/м ²	
		синусоїдальний струм	несинусоїдальний струм (k _{в/г} = 14%)
Полка консолі	Без повздовжніх розрізів	10,8	18,06
	Два розрізи	7,4	12,35
	П'ять розрізів	1,93	3,22
Пресувальна пластина першого пакету	Без повздовжніх розрізів	12,5	15,80
	Два розрізи	7,09	9,36
	П'ять розрізів	2,71	3,51

З результатів дослідження поверхневих втрат, наведених в табл. 3, видно, що застосування відповідних заходів з переривання контурів в полиці нижньої консолі і пресувальній пластині дозволяють істотно знизити нагрів і розробити відповідні технічні рекомендації. Зокрема, в полиці нижньої консолі при різній кількості повздовжніх розрізів поверхневі перегріви при несинусоїдальному струмі збільшуються практично однаково (на 67,0; 66,9; 66,8%). У пресувальній пластині при таких же технічних рішеннях і однакових токах поверхневі втрати зростають на 26,4; 32,0 і

29,5%, відповідно при одному, двох і п'яти розрізах. Наведені розбіжності між результатами досліджень полки і пресувальної пластини пояснюються двома причинами. Перша полягає в тому, що полка консолі знаходиться навпроти каналу розсіювання електромагнітного поля. Друга – геометричні розміри полки консолі істотно перевищують розміри пресувальної пластини першого пакету магнітної системи.

При зміні потужності від 50 до 67 МВА питомі втрати, як при синусоїдальному, так і різкозмінному струмах зростають в 1,76 раз, в той час як співвідно-

шення потужностей становить 1,34. Враховуючі, що втрати потужності пропорційні квадрату напруженості магнітного поля, яка в свою чергу пропорційна збуджувальному струму, то зазначене відношення становить 1,328. При цьому похибка не перевищує 6%.

В. ВИСНОВКИ

Систематизований аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати наступні науково-технічні висновки:

1. Метод фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів дозволяє отримати більш повну інформацію про електромагнітні процеси, що протікають в електротехнічному обладнанні призначеному для живлення технологічних об'єктів з різкозмінним навантаженням та іншому обладнанні.

2. Фізичне моделювання у поєднанні з методами теорії подібності та еквівалентності нестационарних електромагнітних процесів дозволяє враховувати вплив вищих гармонік різкозмінного навантаження на місцеві перегриви з похибкою, яка не перевищує 6%, що задовольняє інженерній практиці і може ефективно використовуватися на стадіях модернізації електротехнічного обладнання загального та спеціального призначення при використанні в потужних електротехнологічних установках.

3. Для підвищення ефективності експериментального дослідження нестационарних електромагнітних процесів і відповідності їх реальним, необхідною умовою є одночасне вимірювання зовнішніх різкозмінних і відповідних їм внутрішніх електромагнітних параметрів, оскільки незначна різниця у збуджуючих параметрах призводить до суттєвої розбіжності в отриманих результатах.

4. Доцільно продовжити подальший розвиток фізичного моделювання з урахуванням умов формування зрівняльних потоків в магнітній системі при несиметрії збуджуючих трифазних струмів.

5. Наведені методи фізичного моделювання доцільно використовувати для отримання достовірної інформації для розробки комп'ютерних моделей нестационарних електромагнітних процесів при різкозмінних навантаженнях електромеханічних об'єктів спеціального призначення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1966. – 487 с.
- [2] Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование: монография / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия. -1969. – 304 с.
- [3] Зиновкин В.В. Исследование поверхностных потерь в массивных конструкционных сталях при намагничивании резкопеременным и постоянным магнитными полями / В.В.Зиновкин // Праці ІЕД НАН України. Енергетика 200. – 2000. – С. 17–30.
- [4] Зиновкин В.В. Вероятностные параметры резкопеременных нагрузок энергоёмких электротехнологических комплексов / В.В. Зиновкин // Праці ІЕД НАН України. – 2005. – №1(10).– С. 136–144.
- [5] Зиновкин, В.В. Методика экспериментальных исследований физических процессов на моделях силового электрооборудования при резкопеременных токах / В.В.Зиновкин, В.В.Куш, М.Ю.Залужный // Доклады 4-й научно-технической конференции: «Метрология электрических измерений в электротехнике». РАО «ЕС России», ОАО «ВНИИЭ». М. 2004. – С. 264 – 268.
- [6] Gzarneski L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Non-sinusoidal Waveforms and Asymmetry / L. Gzarneski // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 11. – №3. – 1996. – pp. 1244–1250.
- [7] Zinovkin, V. Physical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Transformer Equipment under Strongly Varying Loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov, J. Vasilieva // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th–17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017. – pp. 312–315.
- [8] Zinovkin V. Determination of equivalent quantities of electromagnetic field in massive ferrous details of electric equipment under strongly varying loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov // Electrical Engineering and Power Engineering. – No. 4, 2018. – pp. 8–16. DOI:10.15588/1607-6761-2018-4-1
- [9] Mironov, Yu. M. Specific Features of Electric Arc Furnaces as Electric Energy Receivers / Yu. M. Mironov // Russian Metallurgy (Metally). – 2021, 703–708 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0036029521060185>
- [10] Robinson B.C. Supply-voltage and current variations produced by a 60-ton 3-phase electric arc furnace / B.C. Robinson, A.I. Winder // Proceedings of the IEE – Part A: Power Engineering, Volume 105, Issue 22, p. 305–318. DOI:10.1049/pi-a.1958.0054
- [11] Brociek, W.; Grzywacz, T.; Wilanowicz, R. Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load. In Proceedings of the 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Kutna Hora, Czech Republic, 11–13 September 2017.
- [12] Albert, H. Propagation of disturbances as voltage fluctuations in transmission networks. Probl. Energeticii Reg. 2016/ H. Albert, N. Golovanov, L. Elefterescu // 2016. – pp. 48–54.
- [13] Lozynskyi, O.Y. Synthesis and analysis of arc furnace electrical mode control system on the basis of three-dimensional phase currents vector distribution / O.Y. Lozynskyi, A.O. Lozynskyi, Y.S. Paranchuk, R.Y. Paranchuk // Electr. Eng. Electromech. – 2019. – No 4. – pp. 26–34.

- [14] Liu, X. Simulation research on the influence of electric arc furnace nonlinear characteristics on power supply network / X. H. Liu, G. Zhao, J. J. Yu // Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering. – 2004. – pp. 34–38.
- [15] Mendis, S.R. Harmonics and transient overvoltage analyses in arc furnace power systems / S.R. Mendis, D.A. Gonzales // IEEE Transactions on Industry Applications, 28(2), 1992. – pp. 336–342.
- [16] Girgis, A.A. Measurement of the parameters of slowly time varying high frequency transients / A.A. Girgis, J. Qiu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 38(6), 1989. – pp. 1057–1063.
- [17] EN 50160: 2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 30-Jul-2010.
- [18] Koppikar, D. A. Evaluation of eddy losses due to high current leads in transformers / D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, S. K. Jha // Proceedings IEE – Science Measurement and Technology, Vol. 144, No. 1, 1997. – pp. 34–38.
- [19] Lefevre, A. 3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads / A. Lefevre, L. Miegerville, J. Fouladgar, G. Olivier // IEEE Transactions on Magnetics. – Vol. 41. – No. 5, 2005. – pp. 1564–1567.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2021

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

- ЗИНОВКИН В.В.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: znvzv@ukr.net;
- БЛИЗНЯКОВ А.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- КРИСАН Ю.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: krisan@mail.com;
- ЗАЛУЖНЫЙ М.Ю.** ст. преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: zaluzhny_m@ukr.net.

Цель работы. Разработать и экспериментально подтвердить методику физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов в мощном силовом трансформаторе, функционирующем при резкопеременных нагрузках, путем сочетания критериев подобия и коэффициентов эквивалентности.

Методы исследования. При проведении исследований использовались теоретические положения математического и компьютерного моделирования, теоретической электротехники, а также теория эксперимента с применением коэффициентов эквивалентности.

Полученные результаты. Разработаны методы экспериментального исследования, включающие формирование и регистрацию совокупности внешних и внутренних параметров физических моделей, макетных образцов и реального оборудования. Получены критерии подобия нестационарных электромагнитных процессов, возбуждаемых резкопеременными полями рассеивания в силовых трансформаторах специального назначения.

Научная новизна. Дальнейшее развитие получила теория и практика физического моделирования, а также теория подобия нестационарных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах специального назначения и формирования совокупности характерных черт испытательных режимов и их регистрации.

Практическая ценность. Внедрение физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов на стадиях проектирования и изготовления силовых трансформаторов для систем электроснабжения дуговых сталеплавильных печей, приводов прокатных станков и др., а также при модернизации силовых трансформаторов общего назначения.

Ключевые слова: физическое моделирование; нестационарные электромагнитные процессы; трансформаторное оборудование; резкопеременные нагрузки; надежность; аварийность; критерии подобия; коэффициент эквивалентности

PHYSICAL MODELING OF UNSTEADY ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN POWER TRANSFORMER UNDER SHARP LOAD FLUCTUATIONS

- ZINOVKIN V.V. Sci.D, Professor, Professor of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: znvvv@ukr.net;
- BLYZNIAKOV O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electric and electronic apparatus department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- KRYSAN Yu.O. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: krisan@mail.com;
- ZALUZHNYI M.Yu. Senior Lecturer of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: zaluzhniy_m@ukr.net

Purpose. To develop and experimentally confirm the method of physical modeling of non-stationary electromagnetic processes in a powerful power transformer operating under variable loads by combining similarity criteria and equivalence coefficients.

Methodology. Theoretical provisions of mathematical and computer modeling, theoretical electrical engineering were used in the research, as well as the theory of experiment with the application of equivalence coefficients.

Findings. Methods of experimental research were developed, which include the formation and registration of a set of external and internal parameters of physical models, prototypes and real equipment. Criteria for similarity of non-stationary electromagnetic processes excited by sharply changing scattering fields in special purpose power transformers are obtained.

Originality. The theory and practice of physical modeling, as well as the similarity theory applied to unsteady electromagnetic processes in powerful transformer equipment for special purposes were further developed. A set of distinctive features of test conditions and their registration were formed.

Practical value. Application of physical modeling of unsteady electromagnetic processes at the design and manufacture stages of power transformers for power supply systems of electric arc furnaces, rolling mill drives, etc., as well as during the refinement of general-purpose power transformers.

Keywords: physical modeling; unsteady electromagnetic processes; power-intensive electrical equipment; sharp load.

REFERENCES

- [1] Venikov V.A. (1966) Teorija podobija i modelirovanija primenitel'no k zadacham jelektrojenergetiki. M. Vysshaja shkola. 487.
- [2] Ivanov-Smolenskij, A.V. (1969). Jelektromagnitnyje polja i processy v jelektricheskijh mashinah i ih fizicheskoe modelirovanie: monografija. M. Jenergija. 304.
- [3] Zinovkin V.V. (2000). Issledovanie poverhnostnyh poter' v massivnyh konstrukcionnyh staljah pri namagnichivanii rezkoperemennym i postojannym magnitnymi poljami [Research of surface losses in massive structural steels under magnetization by sharply fluctuating and invariable magnetic fields]. *Praci IED NAN Ukraini. Energetika 200.* 17–30. (in Russian.)
- [4] Zinovkin V.V. (2005). Verojatnostnyje parametry rezkoperemennyh nagruzok jenergoemkijh jelektrotehnologicheskijh kompleksov [Probabilistic parameters of sharp load fluctuations of power-intensive electro-technological facilities]. *Praci IED NAN Ukraini.* 10. 136–144. (in Russian.)
- [5] Zinovkin, V.V., Kushh, V.V., Zaluzhnyj, M.Ju. (2004). Metodika jeksperimental'nyh issledovanij fizicheskijh processov na modeljah silovogo jelektrooborudovanija pri rezkoperemennyh tokah [Technique for experimental research of physical processes using models of power electrical equipment under sharp current fluctuations]. *Doklady 4-j nauchno-tehnicheskijh konferencii: «Metrologija jelektricheskijh izmerenij v jelektrotehnike».* RAO «ES Rossii», OAO «VNIIE». M. 2004. 264–268. (in Russian.)
- [6] Gzarmeski L. (1996) Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Non-sinusoidal Waveforms and Asymmetry. *IEEE Transactions on Power Delivery.* Vol. 11, No 3, 1244–1250.
- [7] Zinovkin, V. (2017). Physical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Transformer Equipment under Strongly Varying Loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov, J. Vasilieva // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th–17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,

- Ukraine, 312–315.
- [8] Zinovkin, V., Blyzniakov, O. (2018). Determination of equivalent quantities of electromagnetic field in massive ferrous details of electric equipment under strongly varying loads. *Electrical Engineering and Power Engineering*. No. 4, 8–16. DOI:10.15588/1607-6761-2018-4-1
- [9] Mironov, Yu. M. (2021). Specific Features of Electric Arc Furnaces as Electric Energy Receivers. *Russian Metallurgy (Metally)*, 703–708. <https://doi.org/10.1134/S0036029521060185>
- [10] Robinson B.C. Supply-voltage and current variations produced by a 60-ton 3-phase electric arc furnace / B.C. Robinson, A.I. Winder // *Proceedings of the IEE – Part A: Power Engineering*, Vol. 105, Issue 22, 305–318. DOI:10.1049/pi-a.1958.0054
- [11] Brociek, W.; Grzywacz, T.; Wilanowicz, R. Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Kutna Hora, Czech Republic, 11–13 September 2017.
- [12] Albert, H., Golovanov, N., Elefterescu, L. (2016) Propagation of disturbances as voltage fluctuations in transmission networks. *Probl. Energeticii Reg* 48–54.
- [13] Lozynskiy, O.Y., Lozynskiy, A.O., Paranchuk, Y.S., (2019). Synthesis and analysis of arc furnace electrical mode control system on the basis of three-dimensional phase currents vector distribution. *Electr. Eng. Electromech.* No 4, 26–34.
- [14] Liu, X. G. Zhao, J. J. Yu (2004). Simulation research on the influence of electric arc furnace nonlinear characteristics on power supply network. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 34–38.
- [15] Mendis, S.R. Harmonics and transient overvoltage analyses in arc furnace power systems / S.R. Mendis, D.A. Gonzales // *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(2), 1992. – pp. 336–342.
- [16] Girgis, A.A. (1989). Measurement of the parameters of slowly time varying high frequency transients. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38(6), 1057–1063.
- [17] EN 50160: 2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 30-Jul-2010.
- [18] Koppikar, D. A., Kulkarni, S. V., Khaparde S. A., Jha S. K. (1997). Evaluation of eddy losses due to high current leads in transformers. *Proceedings IEE. Science Measurement and Technology*, Vol. 144, No. 1, 34–38.
- [19] Lefevre, A., Miegerville, L., Fouladgar, J., Olivier, G. (2005). 3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 41, No. 5, 1564–1567.