

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Шпака Олександра Леонідовича на тему: «Моделювання періодичних електромагнітних процесів в силових трансформаторах електроенергетичних систем», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

### **1. Актуальність теми та її зв'язок з державними науковими програмами.**

На сьогоднішній день в електроенергетичних системах дуже широко розповсюджено використання трансформаторів. Вони являються одним з основних елементів електричних систем, а тому їх технічні характеристики суттєво впливають на режими роботи електричних систем й, у першу чергу, на надійність та економічність.

Математичне моделювання електромагнітних процесів в силових трансформаторах надає можливість розв'язувати цілу низку практичних та наукових задач. Останнім часом все частіше висувуються вимоги до підвищення точності математичного моделювання, створення методів аналізу процесів в трансформаторах з метою визначення шляхів покращення техніко-економічних показників, розробки більш досконалих конструкцій трансформаторів.

Тому дисертація Шпака О.Л., спрямована на розвиток засобів моделювання електромагнітних процесів у трансформаторах, є актуальною.

Тема дисертації пов'язана з дослідженнями, які проводились в Хмельницькому національному університеті у межах держбюджетних тем: № 1Б-2014 «Розробка високоефективних систем електроопалення та методів їх проектування» (номер держреєстрації – 0114U000270); № 6Б-2016 «Розробка енергоефективної системи опалення та кондиціонування промислових приміщень на базі універсального теплоакумулятора» (номер держреєстрації – 0116U001552); № 5Б-2016 «Науково-прикладні методи та комбіновані системи компенсації пікового навантаження електромереж на базі суперконденсаторів» (номер держреєстрації – 0116U001548).

### **2. Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Наукові положення, висновки і рекомендації, їх достовірність та наукова новизна базуються на коректній постановці завдання досліджень, використанні положень теоретичної електротехніки, теорії електромагнітних перетворювачів енергії, теорії нелінійних диференціальних рівнянь, методів чисельного інтегрування, результатах математичного моделювання. З урахуванням вимог та ступеня представлення основних наукових положень і результатів роботи, їх можна опініти цілком обґрунтованими та достовірними.

### **3. Новизна сформульованих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій.**

1. Вдосконалено математичні моделі одно- і трифазного трансформаторів, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь,

представлених у нормальній формі Коші, і дозволяють на єдиній методологічній основі аналізувати як перехідні, так і усталені періодичні електромагнітні процеси в силових трансформаторах;

2. Вперше розроблено метод оцінювання впливу силового трансформаторного обладнання на енергоефективність систем електропостачання, що ґрунтується на застосуванні розроблених математичних моделей для створення силових трансформаторів з просторовим магнітопроводом, використання яких створює умови для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування та покращання якості напруги в електричних мережах;

3. Розвинуто метод оцінювання чутливості до початкових умов за рахунок представлення матриці чутливості добутком двох інших матриць, перша з яких є матрицею коефіцієнтів вихідної системи рівнянь стану, яка відтворює перехідну реакцію системи на періоді, а друга – матрицею, елементи якої обчислюються з варіаційних рівнянь і є експоненціальною вільною складовою, яка гасить вимушену перехідну реакцію.

#### **4. Значимість результатів роботи для науки і практики.**

Моделі і методи, що запропоновані в роботі, доведені до рівня прикладних положень і рекомендацій та можуть бути використані в організаціях, які проводять дослідження і аналіз електромагнітних процесів, формують стратегію розвитку електроенергетичних систем, оптимізують плани інвестування в розвиток елементної бази енергетичних систем. В результаті впровадження розробок даної роботи як окремих модулів і стандартних підпрограм розширюються функціональні можливості проектних організацій.

Результати дисертації впроваджено в практичну діяльність ПАТ «Хмельницькобленерго», на основі яких у науковій лабораторії виготовлено трифазний трансформатор потужністю 100 кВА напругою 10/0,4 кВ з монолітною магнітною системою і груповий трансформатор потужністю 25 кВА напругою 10/0,4 кВ з просторовою магнітною системою. Методи і засоби аналізу електромагнітних процесів використовуються при розробці енергоефективної системи опалення та кондиціонування промислових приміщень з використанням трансформаторів нового типу, універсального тепло акумулятора та комбінованих систем компенсації пікового навантаження електромереж на базі суперконденсаторів.

#### **5. Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.**

Наукові положення, висновки і рекомендації, представлені в дисертації і авторефераті, повністю відображено в 14 наукових працях, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, 2 статті в іноземних періодичних виданнях, 1 – тези наукової конференції.

Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень пройшли достатню апробацію, доповідалися та обговорювалися на семи науково-технічних конференціях.

Оформлення дисертації та автореферату відповідають вимогам. Автореферат написано у відповідності до тексту дисертації і містить основну сутність виконаних досліджень і отриманих результатів.

## **6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності.**

В першому розділі проведено аналіз методів моделювання і розрахунку перехідних і усталених процесів в елементах електричних систем. Запропоновано здійснювати аналіз перехідних процесів, вимушеного періодичного, та визначення стійкості знайденого режиму на основі одного математичного апарату – загальної теорії диференціальних рівнянь. Також з метою усунення проблеми опису нелінійностей магнітопроводів пропонується магнітні кола пристроїв описувати, використовуючи методи електромагнітних кіл. Сформульовані задачі на дослідження.

В другому розділі на основі теорії електромагнітних кіл запропоновано підходи щодо побудови математичних моделей трансформаторів, відмінних з точки зору чисельної реалізації. Завдяки відсутності процедури обертання матриці коефіцієнтів на кожному часовому кроці інтегрування забезпечується підвищення точності розрахунків. Перша розроблена математична модель  $n$ -обмоткового трансформатора утворена системою нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь. Друга математична модель  $n$ -обмоткового трансформатора складається з диференціальних рівнянь, представлених у нормальній формі Коші відносно похідних потокозчеплень за часом. Третя математична модель  $n$ -обмоткового трансформатора заснована на диференціальних рівняннях, що розв'язані аналітично відносно похідних струмів за часом.

В третьому розділі розглянуті методи аналізу перехідних і усталених процесів в силових трансформаторах. Запропоновано розширити застосування моделі чутливості до початкових умов стосовно аналізу періодичних процесів електромагнітних пристроїв як елементів енергетичних систем. Здійснено постановку і розв'язання двоточкової періодичної крайової задачі для системи нелінійних диференціальних рівнянь електромагнітних кіл у неперервному часі. Запропоновано визначення матриці чутливості до початкових умов, шляхом представлення її добутком двох інших матриць. Метод визначення моделі чутливості до початкових умов дав можливість об'єднати в єдиний алгоритм розрахунок перехідних і усталених процесів та визначення їх статичної стійкості.

Для оцінки правильності вибору параметрів трансформатора запропоновано метод оцінювання параметричної чутливості, що ґрунтується на використанні моделі чутливості до початкових умов. Метод також дозволяє визначати значення максимально можливих відхилень цих параметрів під час розв'язання проектних і експлуатаційних задач.

В четвертому розділі проведено математичне моделювання електромагнітних процесів в однофазних та трифазних трансформаторах та аналіз отриманих результатів. Проведено оцінювання параметричної чутливості та обґрунтування просторової магнітної системи силового

трансформатора. Вказано на кращу пристосовуваність до несиметричних режимів запропонованого трансформатора. Виконано аналіз впливу розробленого трансформатора з просторовою магнітною системою на усталений режим електричної мережі в умовах переходу до електроопалювання.

В загальних висновках наводиться формулювання розв'язаної науково-прикладної задачі та узагальнення отриманих наукових та практичних результатів.

Додатки містять інформацію про впровадження результатів роботи, список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

Дисертація містить усі необхідні структурні компоненти, а її обсяг знаходиться в рамках встановлених норм.

Наведена оцінка змісту дисертації засвідчує її завершеність та відповідність встановленим вимогам і спеціальності, за якою вона подана до захисту.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації і повністю відображає її кваліфікаційні ознаки.

## **7. Зауваження по дисертаційній роботі.**

1. В роботі розроблені математичні моделі та методи дослідження, які є необхідними інструментами для проведення досліджень і розробки нових трансформаторів. Але вони не об'єднані в систему, яка орієнтована на розробку нових трансформаторів і не видно яким чином вони використані при розробці трансформаторів із просторовою магнітною системою.

2. У підрозділі 1.2 не вказано на підставі чого зроблено висновок про низьку точність методів дослідження періодичних процесів у дискретному часі. Яким чином оцінювалась точність?

3. Автор намагається вийти за самим ним встановлені межі в темі дисертації – процеси в силових трансформаторах. Він вказує на друге завдання дисертації – створення математичних моделей електромагнітних пристроїв, але ніде по тексті дисертації не вказується на якісь особливості цих пристроїв.

4. Припущення про можливість не враховувати втрати в сталі не обґрунтоване (стор.45).

5. Незрозуміло, на підставі чого зроблено висновок про те, що чисельне інтегрування системи рівнянь (2.31) - (2.33) явними методами, наприклад Рунге-Кутта, дасть змогу розраховувати перехідний процес. Про який перехідний процес йде мова?

6. Чому не розглянути (розділі 3.3) можливість пониження порядку системи рівнянь для визначення матриці чутливості щоб забезпечити обчислення за допомогою різницевої формули розв'язування задачі Коші.

7. Обмеженість перехідного процесу у часі до 0,1 – 0,3 с не є правильною. Це може стосуватись тільки окремих випадків. Реально час перехідних процесів може значно перевищувати вказане значення.

8. У розділі 4 (стор.136) наведена концепція про дзеркальність відображення явища електромагнетизму, на підставі якої розроблено конструкцію трифазного трансформатора з просторовою монолітною магнітною системою. Але розроблені математичні моделі та методи аналізу перехідних процесів в силових трансформаторах не використовувались для цього.

9. Не ясно, яким чином враховані особливості конструкції розроблених трансформаторів у разі виконання розрахунків режимів ряду районних електричних мереж за допомогою DigSILENT Power Factory 15.1.

10. В роботі є ряд неточностей.

- На стор.22 до втрат холостого ходу віднесено тільки втрати внаслідок перемагнічування. Але на стор.23 добавлено ще й втрати на вихрові струми.

- На стор.121 вказано «режим неробочого ходу». Раніше по тексту приводилось «режим холостого ходу». На стор.133 – знову «холостого ходу».

- На рис.4.19 - 4.21 показані тільки трифазні трансформатори, але виходячи з тексту повинні бути також однофазні.

- У висновку 5 дисертації вказано «...трансформатор з сторовою магнітною системою...», треба «...з просторовою...». В авторефераті ця частина фрази у висновку 5 відсутня.

Наведені зауваження не ставлять під сумнів наукову новизну чи практичну значимість одержаних в дисертації результатів.

#### **8. Висновок.**

Дисертація Шпака О.Л. є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності розв'язують актуальну науково-прикладну задачу створення моделей силових трансформаторів як елементів електроенергетичних систем для дослідження періодичних електромагнітних процесів в них, що дозволяє покращити техніко-економічні характеристики трансформаторів. Отримані результати мають важливе значення для електричних систем, аналізу режимів роботи та розробки нових силових трансформаторів.

За змістом та одержаними результатами дисертаційна робота задовольняє вимогам п.9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів №656 від 19 серпня 2015 р., а її автор Шпак Олександр Леонідович, заслуговує присудження наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Офіційний опонент, доктор технічних наук,  
професор, завідувач кафедри електропостачання  
ім. проф. В.М. Синькова Національного університету  
біоресурсів і природокористування України  
Міністерства освіти і науки України

М. В. Гребченко

