

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КВАЗІПОСТІЙНИХ СТРУМІВ В НЕЙТРАЛІ НА РЕЖИМНІ ПАРАМЕТРИ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

В роботі представлено розробку імітаційної моделі автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330. Змодельовано електричну та магнітну системи автотрансформатора. Підтверджена адекватність розробленої моделі реальному автотрансформатору шляхом порівняння параметрів моделі та паспортних даних автотрансформатора. Представлено результати дослідів неробочого ходу та короткого замикання. Запропоновано використання розробленої імітаційної моделі для дослідження впливу квазіпостійних струмів у нейтралях автотрансформаторів магістральних мереж змінного струму.

**Ключові слова:** силовий автотрансформатор, геомагнітні індукційні струми, магнітне коло, електричне коло, крива намагнічування.

### Вступ

При збуренні магнітного поля Землі як періодичними, так і випадковими спалахами на Сонці на поверхні Землі виникають наведені потенціали, які викликають протікання квазіпостійних геомагнітних індукційних струмів (ГІС) в усіх електропровідних протяжних елементах на поверхні землі (нафтопроводах, газопровадах), в тому числі і магістральних електричних мережах, нейтралі автотрансформаторів яких мають зв'язок з землею [1]. Окрім цього, квазіпостійні струми у нейтралях автотрансформаторів магістральних мереж змінного струму можуть бути викликані процесами у вставках постійного струму, коли в якості зворотного шляху використовується земля, і струм по землі призводить до виникнення різниці потенціалів між нейтраліями заземлених силових трансформаторів.

В залежності від географічного місця розташування підстанції, конфігурації магістральної електричної мережі 750 кВ, напрямку і величини вектора геоелектричного поля та наявності вставок постійного струму квазіпостійні струми в обмотках автотрансформаторів (АТ) можуть розподілятися по одному з чотирьох можливих варіантів, як показана на рис.1. [2]

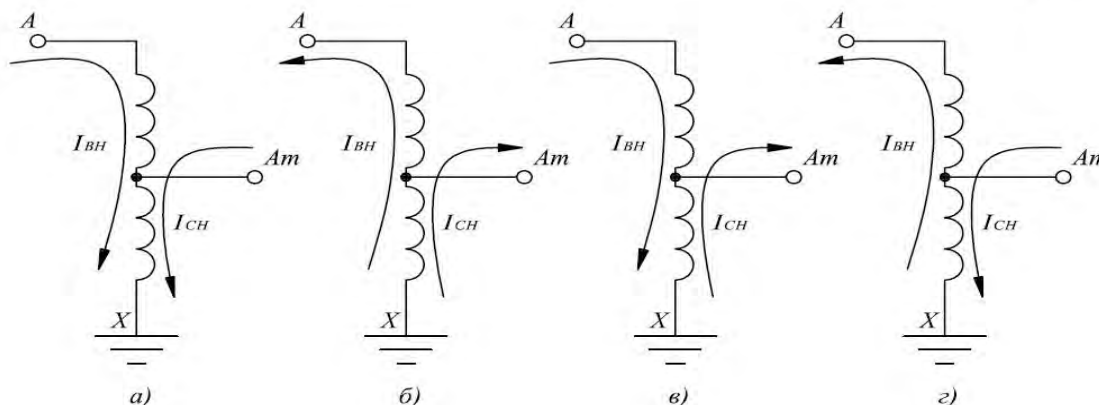


Рисунок 1 – Шляхи протікання ГІС по обмоткам фази автотрансформатора

Важливим моментом для встановлення впливу квазіпостійних струмів на насичення магнітної системи групи однофазних автотрансформаторів напругою 750 кВ є оцінка розподілу індукції в магнітній системі автотрансформатора. Схематичне розташування та з'єднання обмоток досліджуваного автотрансформатора потужністю 333 МВА приведено на рис.2. На рис.3.

представлена схема заміщення магнітної системи, у відповідності до конструкції автотрансформатора.

Прийняті напрямки протікання струмів в обмотках відповідають випадку представленою на рис.1в.

Слід також розрізняти як точки початку обмоток, так і напрямки намотки – лівостороння чи правостороння. Напрямки струму щодо нормалі площини зображення показані у вигляді круга з точкою (напрямок до спостерігача) та перехрестям в середині (напрямок від спостерігача).

### Мета та завдання

Метою роботи є створення імітаційної моделі силового автотрансформатора змінного струму напругою 750 кВ для дослідження впливу квазіпостійних струмів у нейтралі на його характеристики.

За основу створення моделі взято паспортні дані автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330. Для спрощення моделі прийнято, що обмотка низької напруги НН відключена, а контакти регулятора під напругою РПН знаходяться на нульовому відгалуженні. Синтезуємо електричну схему заміщення обмоток автотрансформатора та зв'язану з нею за допомогою керованих джерел струму магнітну схему заміщення магнітопровода із заданою нелінійною характеристикою кривої намагнічування електротехнічної сталі  $f=B(H)$ . За критерій адекватності моделі прийнято співпадіння параметрів дослідів короткого замикання КЗ та неробочого ходу НХ моделі та паспортних даних реального автотрансформатора.

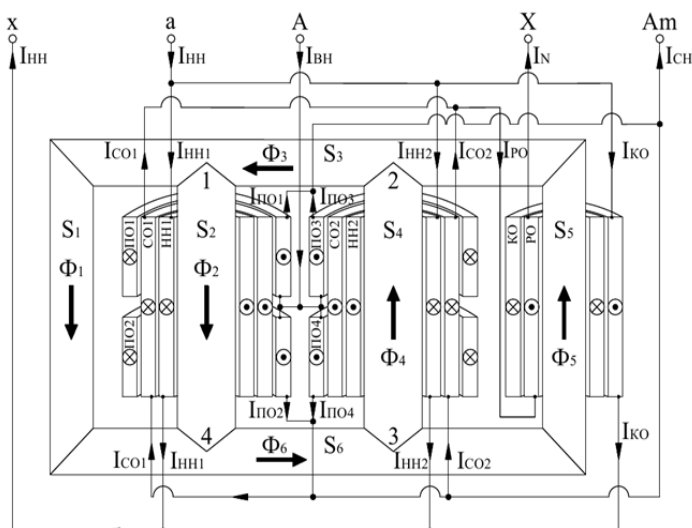


Рисунок 2 – Схематичне розташування та з'єднання обмоток автотрансформатора:  $S_{1-6}$  – поперечні перерізи стрижнів;  $\Phi_{1-6}$  – магнітні потоки в стрижнях;  $I_{CO}$  ( $I_{CO1-2}$ ) – струм в спільній обмотці СО;  $I_{ПО}$  ( $I_{ПО1-4}$ ) – струм в послідовній обмотці ПО;  $I_{РО}$  – струм в регулювальній обмотці РО;  $I_{НН1-2}$ ,  $I_{КО}$ ,  $I_{НН}$  – струми в обмотці низької напруги НН та компенсаційній обмотці КО;  $I_N$  – струм в нейтралі.

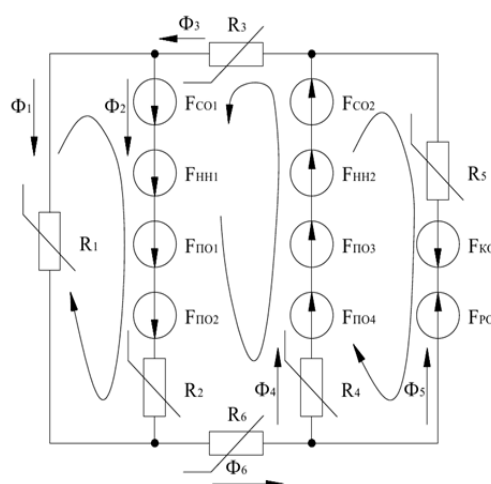


Рисунок 3 – Схема заміщення магнітної системи автотрансформатора

### Матеріал і результати досліджень

Для створення імітаційної моделі еквівалентного електричного кола автотрансформатора необхідно визначити вхідну напругу на шести обмотках (чотирьох послідовних та двох спільних), виконати її інтегрування по часу та ділення на відповідну кількість витків кожної обмотки для визначення магнітних потоків в кожному із стрижнів. Магнітні потоки стрижнів формують еквівалентне магнітне коло в вигляді сигналів керованих джерел струму, відповідно, до напруженості магнітного поля з врахуванням нелінійного магнітного опору стрижнів та опору розсіювання. Виходячи з напруженості магнітного поля та відповідної кількості витків визначаються електричні сигнали, які передаються в електричну схему заміщення на керовані джерела струму, для формування струмів в обмотках автотрансформатора.

Магнітоелектрична схема заміщення автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330, показана на рис. 4 та рис. 5.

На входи P1, P2, S1 та P3, P4, S2 подається напруга відповідно з шести обмоток автотрансформатора.

В електричному колі (рис. 4) на кожній обмотці вимірюється падіння напруги, яке інтегрується (для визначення потокозчеплення) і потім відноситься до кількості витків для отримання величини потоку

$$U = \frac{d\Psi}{dt} \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \Phi. \quad (1)$$

Сигнал щодо магнітного потоку кожної з обмоток подається в імітаційну модель магнітного кола на вхід відповідного джерела струму. Кожне джерело зашунтоване лінійним магнітним опором розсіювання. Величина цього опору розраховується в моделі за умови, щоб індуктивність розсіювання обмотки співпадала з індуктивністю розсіювання обмотки реального автотрансформатора.

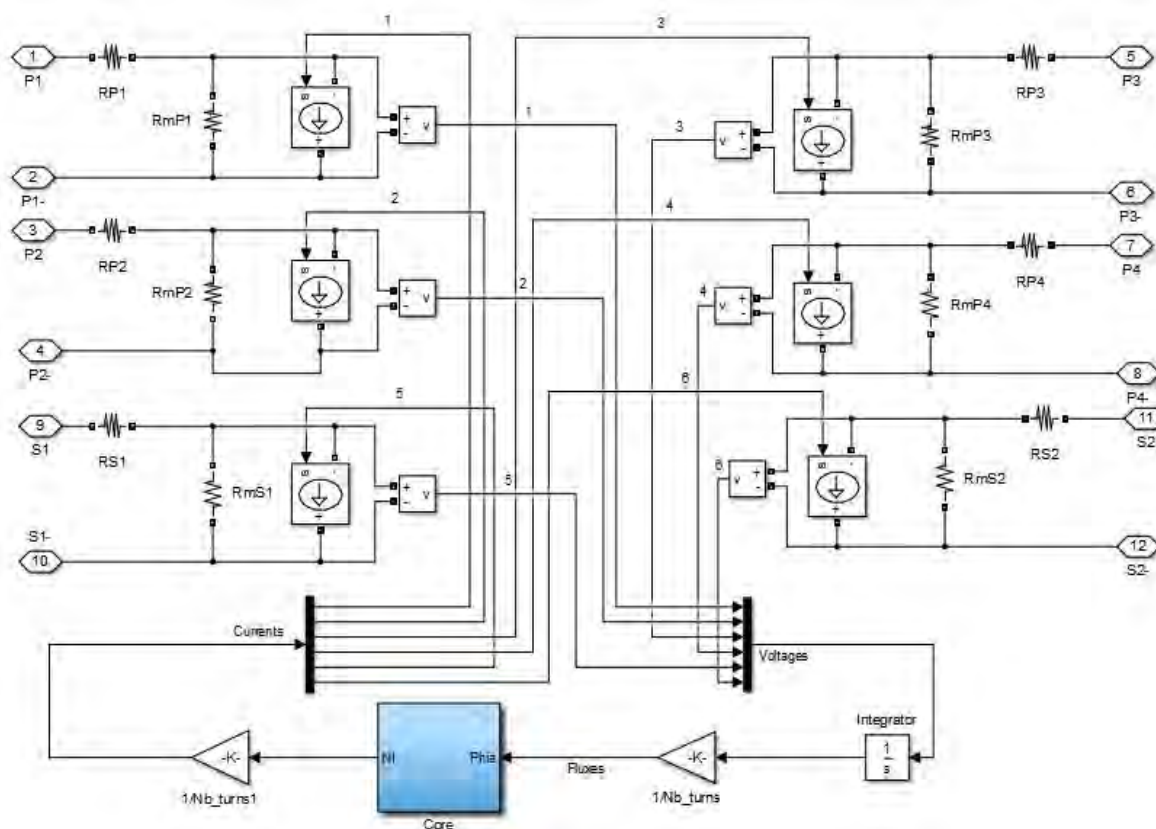


Рисунок 4 – Імітаційна модель автотрансформатора з електричним та магнітним колами

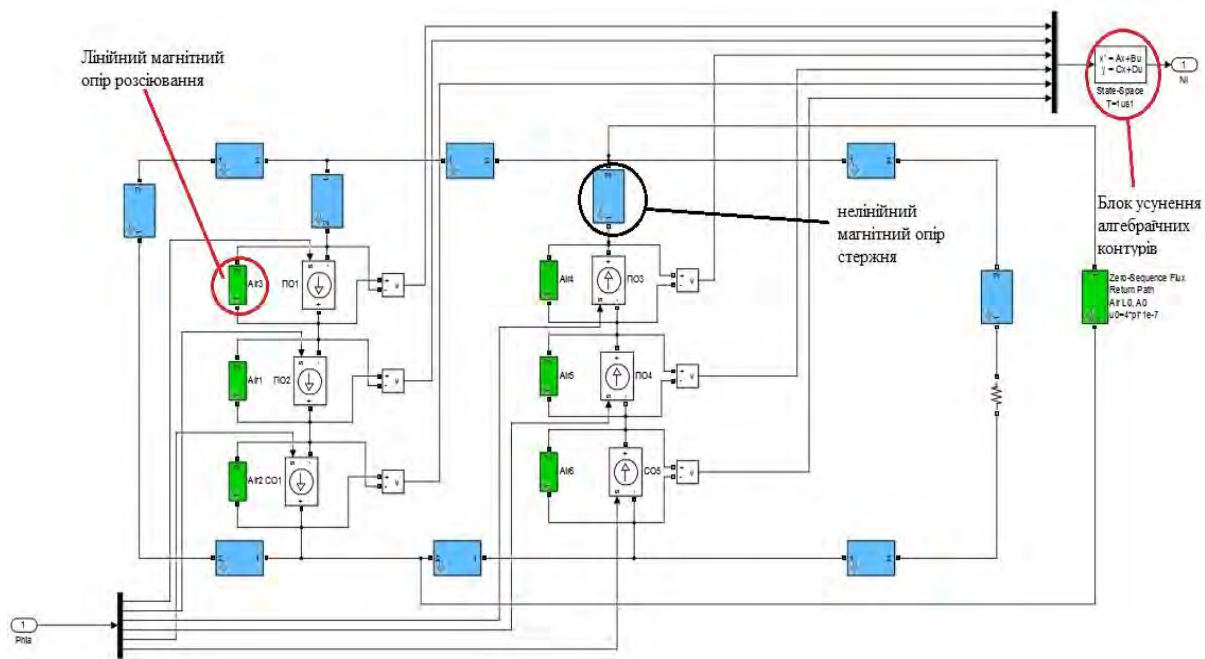


Рисунок 5 – Структура блоку Core (імітаційна модель магнітного кола автотрансформатора)

Магнітне коло автотрансформатора (рис. 5) складається з чотирьох стержнів, які з'єднані ярами. Кожному з двох центральних стержнів відповідають по три джерела струму ПО1, ПО2 та СО1 (відповідно обмоткам), які формують магнітний потік, що створюється послідовними та спільними обмотками автотрансформатора з врахуванням нелінійного магнітного опору стрижнів та ярем.

У блоках нелінійного магнітного опору відповідно до магнітного потоку, перерізу стрижнів та характеру кривої намагнічування сталі  $f=B(H)$  визначається магнітна індукція.

В імітаційній моделі магнітного кола вимірюється падіння напруги на кожному джерелі струму – цей сигнал представляє величину магніторушійної сили  $F_r$ , відповідно ампер-виткам. Значення  $F_r$  від кожного джерела поступає на блок затримки (для усунення алгебраїчних контурів), потім відноситься до числа витків  $i = \frac{F_r}{w}$ . Таким чином визначається сигнал *currents*, який поступає на керуючі входи джерел струму в моделі електричного кола, для формування струму в обмотках електричного кола.

Для врахування втрат в магнітопроводі в електричній схемі заміщення для кожної обмотки паралельно вводиться активний опір  $Rm_p$  для послідовних обмоток та  $Rm_s$  для спільних обмоток. Їх значення в моделі розраховуються так, щоб на неробочому ході сумарні втрати на цих опорах дорівнювали заданим значенням втрат в сталі.

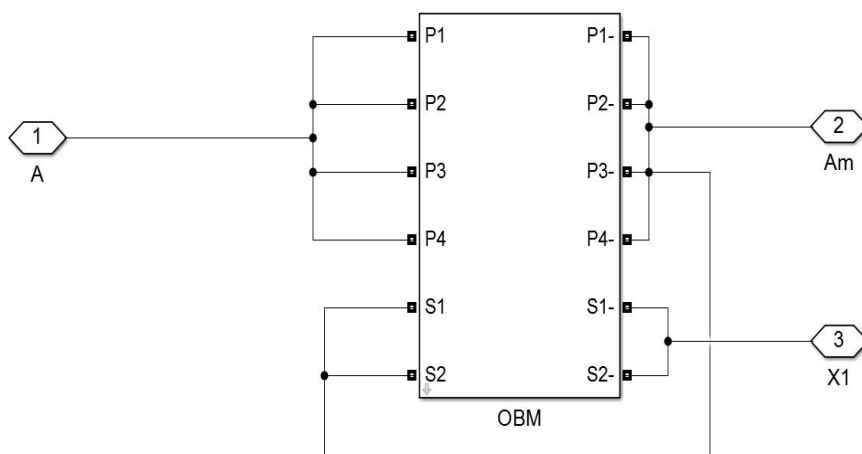


Рисунок 6 – Схема комутації обмоток автотрансформатора

На рис.6 представлена загальна схема з'єднання послідовних та спільних обмоток автотрансформатора відповідно до схеми представленої на рис. 2.

Дані про схему з'єднань обмоток автотрансформатора (рис. 2), розміри магнітної системи, поперечні перерізи стрижнів та ярем, число витків обмоток та матеріал сталі, з якої виготовляється магнітопровід, сформовано відповідно до паспорту автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330.

Для створеної імітаційної моделі автотрансформатора було проведено досліди неробочого ходу та короткого замикання, відповідно, до схем представлених на рис. 7 та рис. 8.

Згідно з паспортними даними для автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330 прийнято: втрати потужності неробочого ходу  $P_{нх} = 217$  кВт; напруги високої та середньої обмоток, відповідно,  $U_{ВН} = \frac{750}{\sqrt{3}} = 433.01$  кВ;  $U_{СН} = \frac{750}{\sqrt{3}} = 433.01$  кВ; напругу короткого замикання  $U_{кзс} = 9.7\% = 42.002$  кВ.

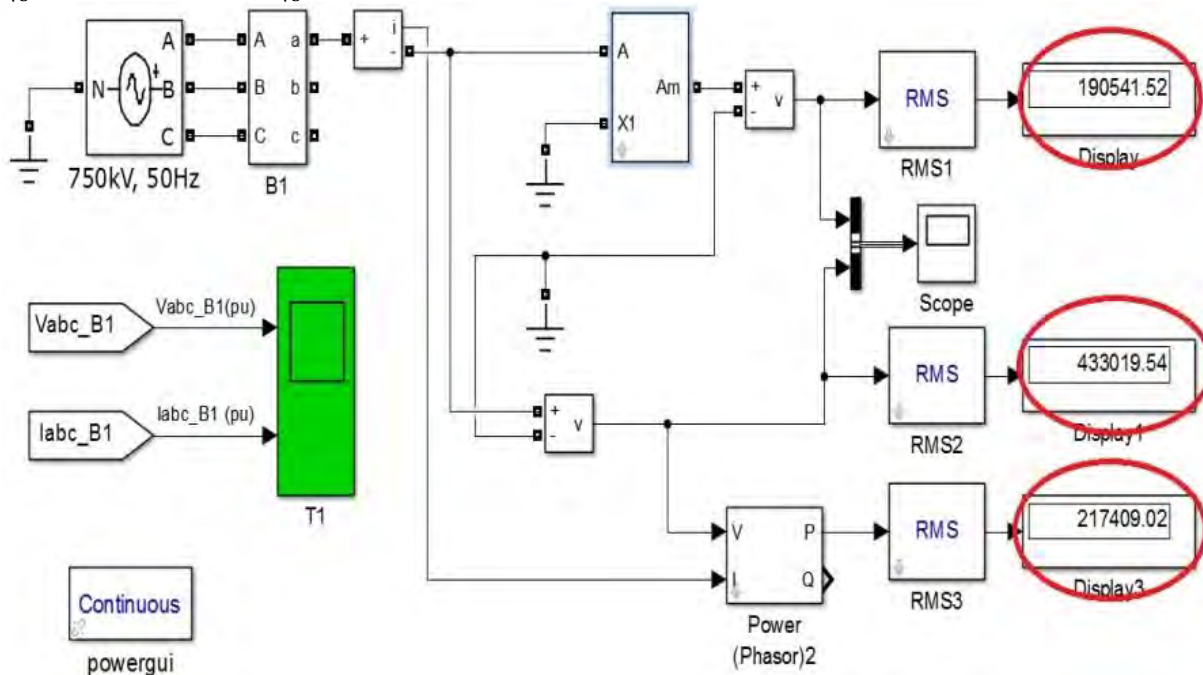


Рисунок 7 – Схема дослідження неробочого ходу для моделі автотрансформатора

В результаті дослідження неробочого ходу, проведеного на розробленій імітаційній моделі, отримано наступні результати: втрати потужності неробочого ходу  $P_{нхд} = 217.41$  кВт; напруга обмоток  $U_{ВНд} = 433.019$  кВ;  $U_{СНд} = 190.541$  кВ.

Відносна похибка результатів отриманих на імітаційній моделі відповідно до паспортних даних складає для:

- втрат потужності неробочого ходу 
$$\delta_{P_{нх}} = \left| \frac{P_{нх} - P_{нхд}}{P_{нх}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{217 - 217.41}{217} \right| \cdot 100\% = 0.19\%;$$

- напруги обмоток 
$$\delta_{U_{ВН}} = \left| \frac{U_{ВН} - U_{ВНд}}{U_{ВН}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{433.01 - 433.019}{433.01} \right| \cdot 100\% = 0.002\%;$$

$$\delta_{U_{СН}} = \left| \frac{U_{СН} - U_{СНд}}{U_{СН}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{190.52 - 190.541}{190.52} \right| \cdot 100\% = 0.011\%.$$

При проведенні дослідження короткого замикання обмотка середньої напруги СН замикається накоротко, а на обмотку високої напруги ВН подається напруга до рівня, що викликає в обмотках ВН та СН номінальні струми.

Номінальні струми для обмоток трансформатора АОДЦТН-333000/750/330, відповідно паспортних даних, складають:

$$I_{H1} = \frac{S_T}{U_{BH}} = \frac{333 \cdot 10^6}{433.01 \cdot 10^3} = 769.03 \text{ A}; \quad I_{H2} = \frac{S_T}{U_{CH}} = \frac{333 \cdot 10^6}{190.52 \cdot 10^3} = 1747.85 \text{ A}.$$

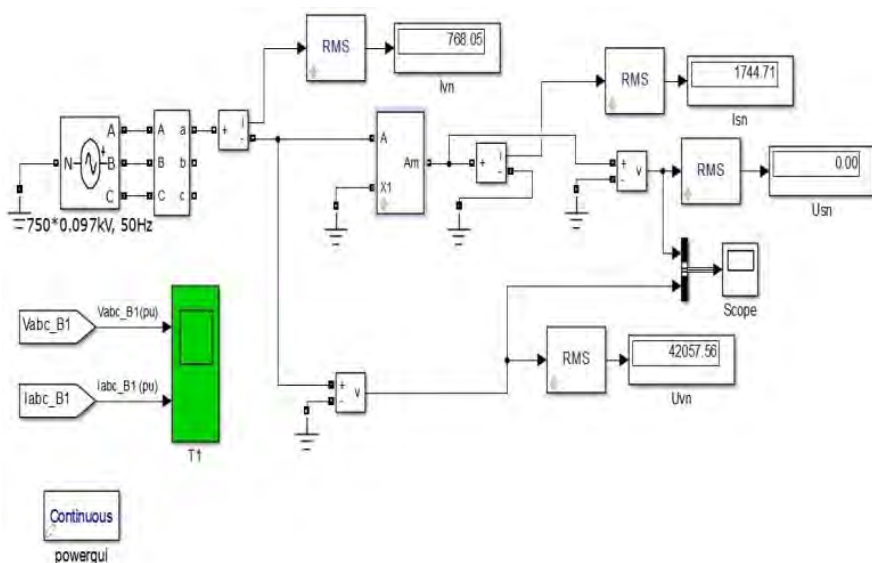


Рисунок 8 – Схема дослід короткого замикання для моделі автотрансформатора

В результаті дослід короткого замикання, проведеного на розробленій імітаційній моделі, отримано наступні результати: струм обмотки високої напруги  $I_{H1д} = 768.05 \text{ A}$ ; струм обмотки середньої напруги  $I_{H2д} = 1744.71 \text{ A}$ ; напруга короткого замикання  $U_{KBHд} = 42.057 \text{ кВ}$

Відносна похибка результатів отриманих на імітаційній моделі відповідно до паспортних даних складає для:

- струму обмотки високої напруги  $\delta_{I_{H1}} = \left| \frac{I_{H1} - I_{H1д}}{I_{H1}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{769.03 - 768.05}{769.03} \right| \cdot 100 \% = 0.13 \%$ ;
- струму обмотки середньої напруги  $\delta_{I_{H2}} = \left| \frac{I_{H2} - I_{H2д}}{I_{H2}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{1747.85 - 1744.71}{1747.85} \right| \cdot 100 \% = 0.18 \%$ ;
- напруги короткого замикання  $\delta_{U_{KBH}} = \left| \frac{U_{KBH} - U_{KBHд}}{U_{KBH}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{42.002 - 42.057}{42.002} \right| \cdot 100 \% = 0.13 \%$ .

### Висновки

Параметри дослідів короткого замикання та неробочого ходу автотрансформатора, отримані на розробленій імітаційній моделі автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330, мають максимальну розбіжність з паспортними даними на рівні 0,19%. Це дає підстави стверджувати адекватність розробленої моделі реальному автотрансформатору і відкриває можливість її використання для визначення впливу квазіпостійних струмів у нейтралі автотрансформатора на параметри мережі змінного струму.

### Список використаної літератури

1. Boteler D.H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline // *Advances in Space Research - ADV SPACE RES*, 26 . – 2000. – С. 15-20.
2. Кирик В.В., Нагорний Р.В. Дослідження розподілу геомагнітних індукційних струмів в магістральних електричних мережах 750 кВ // *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. – 2014. – № 2(36). – С. 101-105
3. Кириленко А.В., Кирик В.В., Подольцев А.Д. Геомагнитные индукционные токи в электрических сетях // *Енергетика та електрифікація*. – 2012. – №11. – С. 46-49.
4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике – К.:Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – С.142-166.

V. Kyryk, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0003-0419-8934  
O. Khudyk, Msc. ORCID 0000-0003-1238-4040  
A. Bilyk, PhD student. ORCID 0000-0002-9822-0612

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## DEVELOPING MODEL OF AVTOTRANSFORMER FOR EXPLORATION OF IMITATION DC IN NEUTRAL ON OPERATING PARAMETERS IN AC NETWORK

*The paper presents the development model of autotransformer AODTSTN-333000/750/330. Simulated electrical and magnetic systems of autotransformer. The adequacy of the developed model to the real autotransformer was confirmed by comparing the parameters of the model and the passport data of the autotransformer. The results of the experiments non-working mode and short circuit mode. The use of the developed simulation model for investigating the influence of quasi-permanent currents in neutrals of autotransformers of trunk AC mains networks is proposed.*

**Keywords:** power transformers, induction geomagnetic currents, magnetic circle, electric circle, the magnetization curve.

### References

1. Boteler D.H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline // Advances in Space Research - ADV SPACE RES, 26 . – 2000. – С. 15-20.
2. Kyryk V.V., Nahorny R. V. Investigation of the distribution of geomagnetically induced currents in the 750 kV main power grids // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyi zhurnal. – 2014. – № 2(36). – P. 101-105 (Ukr.).
3. Kyrylenko A.V., Kyryk V.V., Podoltsev A.D. Geomagnetically induced currents in power networks // Enerhetyka ta elektryfikatsiia. – 2012. – №11. – P. 46-49 (Rus.).
4. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I. N. Multi-physical modeling in electrical engineering - K: In-t electrodynamics NAS of Ukraine, 2015. - S.142-166.

УДК 621.311

В.В. Кирик, д-р техн. наук, профессор, ORCID 0000-0003-0419-8934  
О.І. Худык, магистрант, ORCID 0000-0003-1238-4040  
А.В. Билык, аспирант, ORCID 0000-0002-9822-0612

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ В НЕЙТРАЛИ НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*В работе представлена разработка модели автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330. Смоделированы электрическая и магнитная системы автотрансформатора. Подтверждена адекватность разработанной модели реальному автотрансформатору путем сравнения параметров модели и паспортных данных автотрансформатора. Представлены результаты опытов холостого хода и короткого замыкания. Предложено использование разработанной имитационной модели для исследования влияния квазипостоянных токов в нейтралях автотрансформаторов магистральных сетей переменного тока.*

**Ключевые слова:** силовой автотрансформатор, геомагнитные индукционные токи, магнитная цепь, электрическая цепь, кривая намагничивания.

Надійшла 23.03.2017

Received 23.03.2017