

Б. С. Стогній<sup>1</sup>  
М. Ф. Сопель<sup>1</sup>  
В. І. Паньків<sup>1</sup>  
Є. М. Танкевич<sup>1</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ГРУПАХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України

*Подано короткий аналіз недоліків існуючих математичних моделей трансформаторів струму для захисту та досліджень електромагнітних перехідних процесів в їх групах. Розроблено і представлено комп'ютерну модель таких процесів в програмному середовищі Matlab Simulink, в якій використано модель трансформатора струму, що побудована на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса–Атертона і удосконалена авторами гнучкішим і точнішим способом апроксимації основної характеристики намагнічування. Подано результати розрахунку за розробленою моделлю перехідних електромагнітних процесів в групі трансформаторів струму типу ТФНК-330 зі з'єднанням їх вторинних навантажень за схемою «зірка». Розрахунок виконаний для випадку міжфазного пошкодження ЛЕП та різних комбінацій значень і знаків залишкової індукції в магнітопроводах трансформаторів, а його результати представлені у вигляді осцилограм їх струмів усіх фаз.*

**Ключові слова:** група трансформатор струму, математичне моделювання, перехідні процеси, гістерезис, залишкова індукція.

### Вступ

Моделі ТС, які використовувались раніше для досліджень процесів в ГТС [1—5 та ін.], базувались на певних спрощеннях, серед яких найвагомішим є застосування спрощеного опису характеристики намагнічування (ХН). Найчастіше використовувалась прямокутна апроксимація ХН, що в дослідженні фазних ТС могло вносити 40...50 % розрахункової похибки, дещо рідше — спрямлена ХН. Також були спроби розділяти ХН на декілька частин і апроксимувати кожен з них своєю функцією, що викликало розрив першої похідної і не завжди дозволяло точно описувати фактичні експериментальні дані ХН [5]. Внаслідок таких спрощень не моделювались часткові гістерезисні цикли намагнічування магнітопроводу ТС, а відповідно, не враховувались втрати на вихрові струми та гістерезис.

При дослідженні електромагнітних процесів в ГТС, з використанням моделі ТС з ХН, апроксимованої ідеальною прямокутною кривою чи зі спрямленою ХН, завжди припускалось, що один із ТС групи насичується першим, а далі за принципом ітерацій розрахунок поведінки інших фазних ТС починався з моменту насичення цього ТС. Тобто такий підхід до розрахунку електромагнітних процесів в ГТС не забезпечує достовірність і точність його результатів.

Використана в праці [1] в дослідженні диференціальних струмових захистів із з'єднанням ТС за схемами «зірка–зірка» та «зірка–трикутник» аналітична апроксимація основної ХН ТС арктангенсною функцією з лінійним коефіцієнтом, як показано в праці [7], з досить низькою точністю описує основну ХН і її слід брати лише для наближених розрахунків процесів в ГТС. Модель перехідних процесів ГТС, яка запропонована в праці [5] і ґрунтується на аналітичній апроксимації поділеної на три частини ХН, диференціальних рівняннях ТС і алгебраїчних рівняннях ГТС, що разом розв'язуються за допомогою чисельного інтегрування, громіздка і трудомістка.

Другий вагомий недолік усіх таких моделювань, це неможливість правильного врахування залишкової індукції в магнітопроводах ТС групи, значення якої є одним із основних та найвпливовіших початкових даних моделювання. Відомо, що залишкова індукція виникає внаслідок відключення струму короткого замикання (КЗ) і має тенденцію зберігатись на невизначено тривалий час [8]. Це може спричинити значний вплив на автоматичні повторні включення, функціонування релейного

захисту і збільшувати похибки трансформації струму в усталених режимах експлуатації електромереж.

Використання сучасних засобів обчислювальної техніки, програмного забезпечення та теорії опису процесів намагнічування феромагнітних матеріалів створює можливість підвищення точності моделювання електромагнітних перехідних процесів в ГТС, позбувшись вищезгаданих спрощень та недоліків.

*Метою роботи є розробка сучасної моделі ГТС для дослідження основних особливостей трансформації струмів пошкоджень ЛЕП групами ТС для захисту з різними схемами з'єднання їх вторинних навантажень.*

## Результати дослідження

### Модель ГТС

Для моделювання електромагнітних процесів в ГТС використовувалось програмне середовище Matlab Simulink. Схема для моделювання електромагнітних перехідних процесів в ГТС зі з'єднанням вторинного навантаження в «зірку», що зображена на рис. 1, складається з таких блоків: 1 — програмованого джерела напруги; 2 — параметрів лінії електропередачі, за допомогою якого регулюється діюче значення періодичної складової струму КЗ та значення сталої часу первинного кола при пошкодженні; 3 — навантаження первинної енергосистеми; 4 — характеристик КЗ, за допомогою якого задається тип та регулюється момент виникнення пошкодження; 5 — групи фазних ТС; 6 — вторинних навантажень ТС, з'єднаних за схемою «зірка»; 7 — опору нульового проводу. У блоці 5, модель кожного фазного ТС побудована на основних положеннях теорії феромагнітного гістерезису Джайлса–Атертона [9] і удосконалена авторами гнучкішим способом апроксимації безгістерезисної ХН, що забезпечує точнішу побудову часткових і основної петель гістерезису.

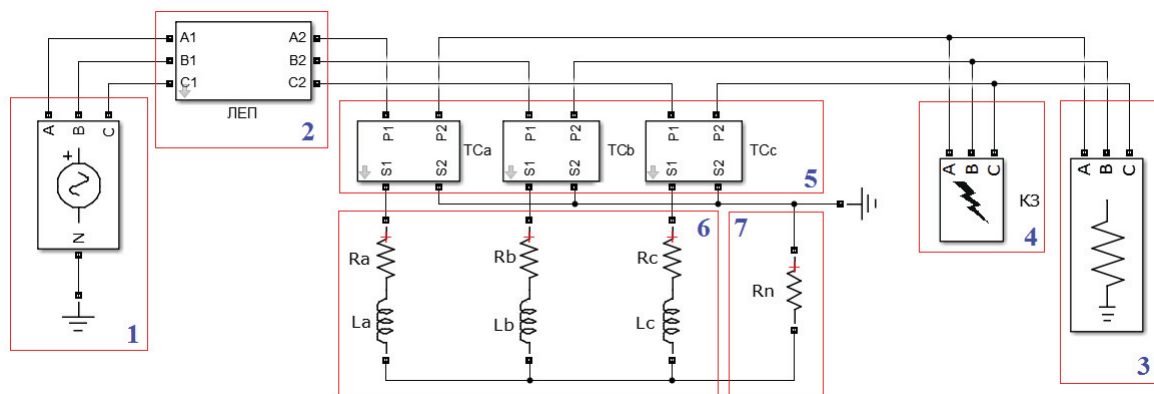


Рис. 1. Схема для моделювання електромагнітних перехідних процесів в ГТС

Зазначимо, що задіяна в цій схемі модель ТС дає можливість досліджувати і всі інші можливі типи з'єднань вторинних обмоток ТС групи (трикутник, неповна зірка, різниця струмів фаз, а також послідовне і паралельне з'єднання).

**Приклад моделювання.** Розглянемо моделювання на прикладі групи ТС типу ТФКН-330, кожний з яких має такі параметри: номінальний первинний струм  $I_{1n} = 2000$  А; номінальний вторинний струм  $I_{2n} = 1$  А; кількість витків первинної обмотки  $w_1 = 1$ ; кількість витків вторинної обмотки  $w_2 = 1995$ ; середня довжина лінії магнітного потоку  $l_c = 0,957$  м; площа поперечного перерізу магнітопроводу  $S = 15,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; опір вторинної обмотки  $Z_{2обм} \approx R_{2обм} = 8,2$  Ом; номінальний опір навантаження на обмотку захисту класу точності 10Р  $Z_{2n} = 40$  Ом з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_{2n} = 0,8$ . Основна петля гістерезису та початкова характеристика намагнічування магнітопроводу відповідають марці сталі 1511 (Э41). Довжина контрольного кабелю типу КВВГ 7×2,5 (ліній зв'язку) становить 625 м, відповідно розрахований опір нульового проводу становить 4,375 Ом.

Як приклад роботи цієї моделі, на рис. 2 показано результати моделювання міжфазного пошкодження фаз А та В поблизу навантаження за ГТС. Стала часу первинного кола при пошкодженні становила  $T_1 = 0,1$  с, в момент виникнення пошкодження для фази А  $\varphi_{1A} = 0^\circ$ , для фази В  $\varphi_{1B} = -120^\circ$ , зі значеннями періодичних складових струму пошкодження у фазі А —  $I_{1A} = 7900$  А, та у фазі В —  $I_{2A} = 5970$  А. При такому пошкодженні досліджувались два випадки: випадок 1 — без залишкової індукції в магнітопроводах ТС ГТС та випадок 2 — за наявності залишкової індукції в магнітопро-

водах ТС ГТС. Зазначимо, що у випадку наявності залишкової індукції розглядався гірший варіант, тобто збіг полярності струму КЗ і залишкової індукції в магнітопроводах ТС ГТС. У магнітопроводі ТС фази А значення залишкової індукції становило  $B_{rA} = 0,7$  Тл, в магнітопроводі ТС фази В —  $B_{rB} = -0,7$  Тл, в магнітопроводі ТС фази С —  $B_{rC} = 0,5$  Тл.

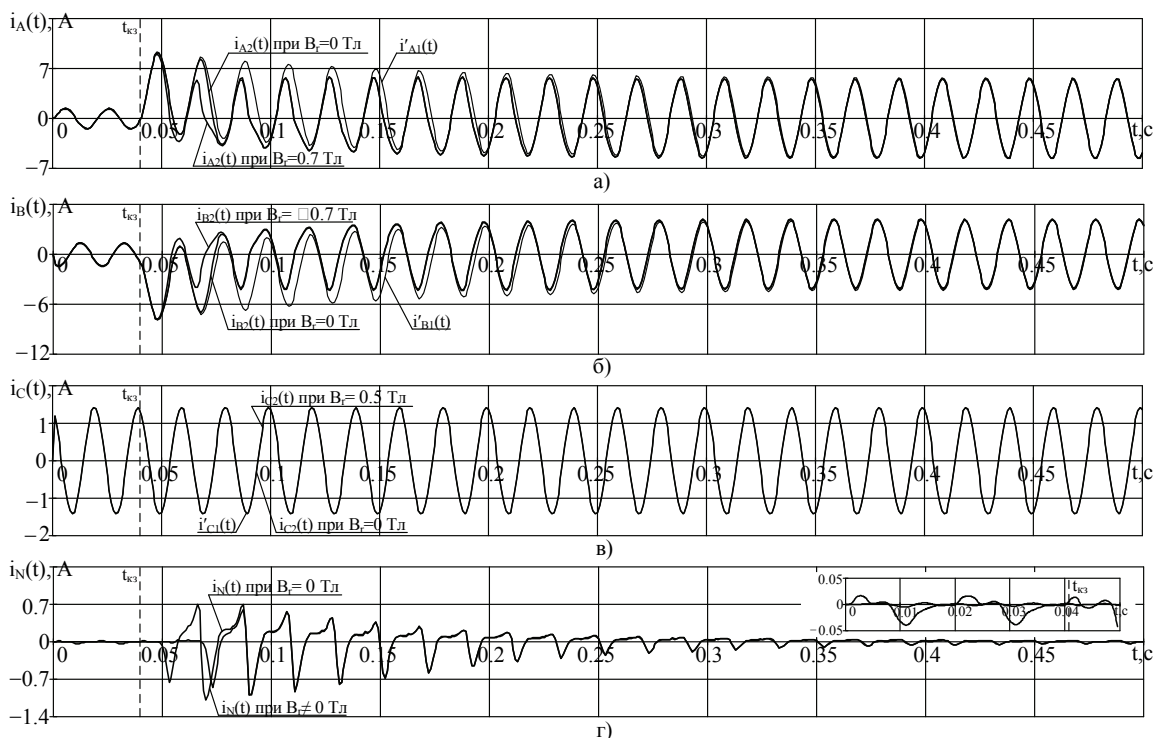


Рис. 2. Перехідні струми в ТС групи в разі міжфазного пошкодження фаз А та В

Як видно на рис. 2а та рис. 2б однополярність залишкової індукції та струму КЗ призводить до швидшого насичення магнітопроводів ТС фаз А та В і до більшої похибки трансформації струмів в порівнянні з її відсутністю. Детальніше, на рис. 3 можна спостерігати абсолютні значення миттєвих похибок ТС всіх фаз, які розраховувались в кожний момент розрахункового часу і, відповідно, являють собою повні похибки трансформації первинного струму для обох випадків. Як видно з рис. 3в, похибка фази С за наявності залишкової індукції є більшою ніж за її відсутності.

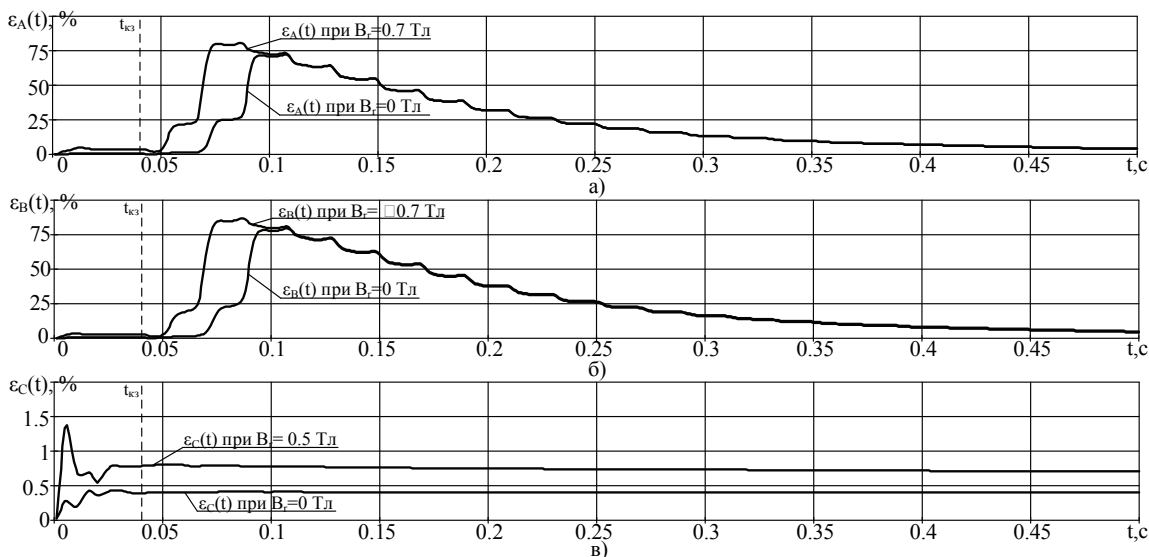


Рис. 3. Повні похибки трансформації первинного струму ТС групи в разі міжфазного пошкодження

Цікаву інформацію дає аналіз значень та форми струму в нульовому проводі до і після пошкодження. Розглядаючи поведінку струму до пошкодження (приблизно перші два періоди моделю-

вання), у збільшеному вигляді на рис. 2г можна побачити вплив залишкової індукції в магнітопроводах ТС групи на появу незначних осциляцій. У випадку відсутності залишкової індукції струм в нульовому проводі до пошкодження практично дорівнював нулю. При виникненні пошкодження, за відсутності залишкової індукції в магнітопроводах ТС, струм в нульовому проводі залишався практично нульовим до насичення магнітопроводів (два магнітопроводи почали насичуватись одночасно, як це детальніше можна спостерігати на рис. 3а та 3б), де з'являються сигнали з затухаючими імпульсами. Ці імпульси зникають зі зменшенням насичення магнітопроводів ТС. За наявності залишкової індукції, після виникнення пошкодження цей процес відбувається дещо швидше і з більшими амплітудами, що пов'язано із глибшим насиченням і більшими похибками трансформації.

В результаті виконаних моделювання та аналізу струмів в нульовому проводі цієї схеми з'єднання ГТС за різних видів пошкоджень в первинній мережі виявлені певні закономірності їх поведінки в кожному конкретному виді пошкодження.

### Висновки

В програмному середовищі Matlab Simulink розроблено комп'ютерну модель ГТС, в якій використана модель ТС, що побудована на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса–Атертона і удосконалена авторами гнучкішим і точнішим способом апроксимації основної характеристики намагнічування, що забезпечує точнішу побудову часткових і основної петель гістерезису.

На відміну від відомих, розроблена модель дозволяє комплексно досліджувати перехідні електромагнітні процеси і струми в кожному ТС групи з урахуванням гістерезисних властивостей їх магнітопроводів і рівня та знаку залишкової індукції в них, а також взаємодії ТС в групі, що створює можливість підвищення точності моделювання електромагнітних перехідних процесів в ГТС.

Описане моделювання стане ефективним інструментом дослідження та аналізу перехідних процесів в ТС в складі групи, їх впливу на поведінку сучасних швидкодійних цифрових захистів, тестування та удосконалення алгоритмів функціонування захистів за будь-якої схеми з'єднання вторинних навантажень ТС групи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аллилуев В. А. Моделирование переходных процессов в дифференциальных токовых защитах / В. А. Аллилуев // Электричество. — 1996. — № 6. — С. 39—41.
2. Аналитическое исследование переходных процессов в схеме «звезда» трансформаторов тока при значительной активной нагрузке / [Л. В. Багинский, В. М. Лещенко, А. Ф. Саломатин, И. П. Тимофеев] // Изв. ВУЗ Электромеханика. — 1982. — № 2. — С. 211—217.
3. Взаимодействие трансформаторов тока в схеме «звезда» при значительной активной нагрузке в режиме трехфазных коротких замыканий / [Л. В. Багинский, В. М. Лещенко, И. П. Тимофеев и др.] // Изв. ВУЗ Энергетика. — 1984. — № 4. — С. 49—53.
4. Дмитриев К. С. Динамическое моделирование групп защитных трансформаторов тока / К. С. Дмитриев // Изв. ВУЗ Электромеханика. — 1976. — № 7. — С. 711—718.
5. Дроздов А. Д. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах / А. Д. Дроздов, С. Л. Кужеков // Электричество. — 1971. — № 1. — С. 27—32.
6. Новаш В. И. Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит / В. И. Новаш, В. Х. Сопьяник // Электричество. — 1982. — № 7. — С. 74—76.
7. Паньків В. І. Апроксимація характеристик намагнічування трансформаторів струму / В. І. Паньків, Є. М. Танкевич, М. М. Лутчин // Праці інституту електродинаміки. — 2014. — Вип. 37. — С. 82—90.
8. Стогний Б. С. О характере влияния остаточной индукции на работу трансформатора тока / Б. С. Стогний. — К. : Труды ИЭД АН УССР. — 1963. — Вып. 20. — С. 44—59.
9. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis / U. D. Annakkage, P. G. McLaren, R. P. Jayasinghe, A. D. Parker // IEEE Transaction on power delivery. — 2000. — Vol. 15. — № 1. — P. 57—61.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.11.2015

**Стогний Борис Сергійович** — д-р техн. наук, професор, академік НАН України, завідувач відділу автоматизації електричних систем;

**Сопель Михайло Федорович** — д-р техн. наук, старш. наук. співроб., провідний науковий співробітник;

**Паньків Володимир Ігорович** — інженер відділу автоматизації електричних систем, e-mail: pan-kiv.volodimir@gmail.com;

**Танкевич Євгеній Миколайович** — д-р техн. наук, старш. наук. співроб., провідний науковий співробітник.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ

**B. S. Stognii<sup>1</sup>**  
**M. F. Sopol<sup>1</sup>**  
**V. I. Pankiv<sup>1</sup>**  
**E. M. Tankevych<sup>1</sup>**

## **Modeling of Electromagnetic Processes in Groups of High-Voltage Current Transformer**

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine

*There has been carried out a brief analysis of the drawbacks of the existing mathematical models of transformers of current in means of protection and electromagnetic transients in their groups. A computer model of these processes has been developed and represented in the software environment Matlab Simulink, in which current transformer model based on the theory of Jiles–Atherton ferromagnetic hysteresis and improved by authors through using of more flexible and accurate approximation approach of anhysteretic magnetization curve. There have been given the results of the developed calculation model of transient electromagnetic processes in the group of current transformers type TFNK-330 with connectivity of secondary stress in a "star". The calculation is made for the case of interfacial fault in transition line with a various combinations of values and signs of remanence in the magnetic cores of current transformers. The results are presented in the form of oscillograms and their currents of all phases.*

**Keywords:** groups of current transformers, mathematical model, transients, hysteresis, remanence.

**Stognii Borys S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Academician of NAS of Ukraine, Head of the Chair of Electrical Systems Automation;

**Sopol Mykhailo F.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Research Assistant, Leading Staff Scientist;

**Pankiv Volodymyr I.** — Engineer of the Department of Electrical Systems Automation, e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com;

**Tankevych Yevgenii M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Assistant, Leading Staff Scientist

**Б. С. Стогний<sup>1</sup>**  
**М. Ф. Сопель<sup>1</sup>**  
**В. И. Панькив<sup>1</sup>**  
**Е. Н. Танкевич<sup>1</sup>**

## **Моделирование электромагнитных процессов в группах высоковольтных трансформаторов тока**

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины

*Проведен краткий анализ недостатков существующих математических моделей трансформаторов тока для защиты и исследования электромагнитных переходных процессов в их группах. Разработана и представлена компьютерная модель таких процессов в программной среде Matlab Simulink, в которой использована модель трансформатора тока, построенная на основе теории ферромагнитного гистерезиса Джайлса–Атертона и усовершенствованная авторами более гибким и точным способом аппроксимации основной характеристики намагничивания. Представлены результаты расчета с использованием разработанной модели переходных электромагнитных процессов в группе трансформаторов тока типа ТФНК-330 с включением их вторичных нагрузок по схеме «звезда». Расчет выполнен для случая междуфазного повреждения ЛЭП и различных комбинаций значений и знаков остаточной индукции в магнитных сердечниках трансформаторов, а его результаты представлены в виде осциллограмм их токов всех фаз.*

**Ключевые слова:** группа трансформатор тока, математическое моделирование, переходные процессы, гистерезис, остаточная индукция.

**Стогний Борис Сергеевич** — д-р техн. наук, профессор, академик НАН Украины, заведующий отделом автоматизации электрических систем;

**Сопель Михаил Федорович** — д-р техн. наук, старш. научн. сотр., ведущий научный сотрудник;

**Панькив Владимир Игоревич** — инженер отдела автоматизации электрических систем, e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com;

**Танкевич Евгений Николаевич** — канд. техн. наук, старш. научн. сотр., ведущий научный сотрудник