

УДК 621.316.13

ГИРАТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

- ПОДУС А.Р. Студент Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: koldun290@gmail.com;
- ПАТАЛАХ Д.Г. Аспирант Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- ТИХОВОД С. М. д.т.н., доц. Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: stikhovod@gmail.com.

Цель работы. Разработка магнитоэлектрических схем замещения, использующих гираторно-конденсаторные модели

Методы исследования. Численные методы решения дифференциальных уравнений состояния, математический аппарат матричной алгебры, компьютерное программирование и методы теории электрических цепей.

Полученные результаты. В результате модификации известного метода расчета переходных электромагнитных процессов на основе магнитоэлектрических схем замещения, разработан метод, использующий гираторно-конденсаторные модели. На основании разработанного метода составлена компьютерная программа для расчета переходного процесса в однофазном трансформаторе, которая показала адекватность метода. Модифицирован универсальный программный комплекс моделирования магнитоэлектрических схем замещения Solo. Показан пример применения модифицированного программного комплекса Solo для расчета переходного процесса в трехфазном трансформаторе. Данный пример показал лучшую наглядность при составлении магнитоэлектрических схем замещения, а также сокращение времени компьютерного моделирования.

Научная новизна. Получено дальнейшее развитие методов расчета электромагнитных процессов на основе нелинейных магнитоэлектрических схем замещения. Модифицирована математическая модель, положенная в основу универсального программного комплекса Solo путем введения нового элемента - гиратора, чем достигнута системность применения гираторно-конденсаторного метода магнитоэлектрических схем замещения.

Практическая ценность. Предложенная модификация универсального программного комплекса Solo позволяет сократить время разработки модели, подготовки исходных данных и позволяет сократить процессорное время моделирования сложных нелинейных электромагнитных устройств.

Ключевые слова: переходный процесс; трансформаторы; магнитоэлектрические схемы замещения; численные методы; схемная модель; магнитные конденсаторы; гираторы

I. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование является неотъемлемой частью разработки электромагнитных устройств, например, трансформаторов. Динамические электромагнитные процессы, приводящие к броскам тока при коммутациях, представляют опасность для трансформаторов. В трансформаторах переходные процессы происходят также и в рабочих режимах, если трансформаторы нагружены на преобразовательные устройства. В настоящее время моделирование переходных процессов в электрических комплексах, связанных с электромагнитными устройствами целесообразно проводить методами теории электрических и магнитных цепей, которые взаимодействуют между собой. Объединенная магнитная и электрическая цепь составляют так называемую магнитоэлектрическую схему замещения (МЭСЗ), которая моделируется как единая цепь [1]-[2]. Для решения этой задачи используется ряд гото-

вых программных комплексов. Наиболее известными из них является EMTP, NAP, NRAFT, PSpice, Micro Cap, ЭЛТРАН, ЦУМПУ, Simulink. Характерной особенностью МЭСЗ является наличие многочисленных управляемых источников напряжения и тока. Управляемые источники создают так называемые «алгебраические петли», которые приводят к тому, что вычислительный процесс существенно затягивается, либо вообще прекращается. Программный комплекс Solo лишен этих недостатков. Однако требуется его модификация.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе широко известен метод расчета электромагнитных процессов на основе нелинейных магнитоэлектрических схем замещения [1]-[2]. В этих работах описана математическая модель, основанная на автоматическом составлении дифференциально-алгебраических уравнений состояния топологически-

ми методами по законам Кирхгофа [3]-[4]. Интегрирование уравнений выполняется численными методами [5]-[6]. Применению МЭСЗ посвящены работы [8], [9]. Появились новые работы, в которых показана эффективность применения гираторов при использовании магнитоэлектрических схем замещения [10]-[11]. Гираторно-конденсаторный метод моделирования МЭСЗ с использованием понятия «магнитный ток» - это шаг вперед в моделировании МЭСЗ. Это дает основание для модификации математической модели, которая положена в основу универсального программного комплекса Colo, а также доработки самого программного комплекса.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является модификация разработанного метода расчета переходных процессов в магнитоэлектрических цепях [7] путем введения нового элемента – гиратора.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для простоты изложения, рассмотрим замкнутый ферромагнитный магнитопровод с длиной средней линии ℓ , на котором расположена катушка, содержащая N витков.

Если подключить к катушке источник переменного напряжения $e(t)$, то по виткам катушки потечет электрический ток $i(t)$ и произойдет переходный процесс. Согласно закону полного тока можно записать:

$$H \cdot \ell = N \cdot i \quad (1)$$

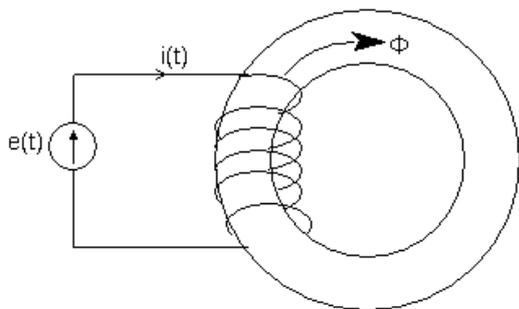


Рисунок 1. Замкнутый ферромагнитный магнитопровод, на котором расположена катушка

В работах [8], [9] М.А. Шакировым предложено использовать понятие магнитного тока смещения $i^m = d\Phi / dt$ по аналогии с электрическим током смещения плотностью dD / dt . Подобно электрическому току смещения, протекающему через емкостной элемент, магнитный ток смещения должен протекать через магнитный емкостной элемент C_m . При этом магнитному потоку отводится роль магнитного заряда $q_m = \Phi$. В дальнейшем магнитный ток смещения будем называть просто магнитным током. Как утверждает Джеймс Клерк Максвелл в работе [12] термин маг-

нитный ток впервые был предложен Оливером Хевисайдом. Метод, предложенный Шакировым, усовершенствован в работе [13].

Продифференцируем выражение (1) по времени:

$$\frac{dH}{dB} \frac{dB}{dt} \ell = N \frac{di}{dt}$$

Преобразуем выражение (1), используя обозначение дифференциальной магнитной проницаемости:

$$\mu^d = \frac{dB}{dH};$$

$$\frac{\ell}{S\mu^d} \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Уравнение (2) представим в другом виде, обозначив производную по времени штрихом:

$$R^d \Phi' = Ni', \quad (3)$$

где введено дифференциальное магнитное сопротивление

$$R^d = \frac{\ell}{\mu^d S} \quad (4)$$

Согласно выражению (3) можно записать:

$$\Phi' = \frac{Ni'}{R^d} = i^m \quad (5)$$

Выполним формальное преобразование выражения (5), вводя дифференциальную емкость, получим:

$$i^m = \Phi' = C_m^d \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6)$$

где C_m^d – дифференциальная емкость так называемого магнитного конденсатора:

$$C_m^d = \frac{\mu^d S}{\ell}, \quad \mu^d = \frac{dB}{dH}.$$

Согласно (3) получен:

$$R^d \Phi' = Ni' = \Phi' / C_m^d \quad (7)$$

Тогда МДС и магнитное напряжение выражаются как:

$$Ni = U_{Cm}; \quad Ni = \Phi / C_m^d. \quad (8)$$

Взаимное влияние электрической и магнитной цепей осуществляют с помощью гираторов. Гиратор впервые предложен Теледженом [14]. Гиратор является элементом цепи и имеет два порта (рис.2).

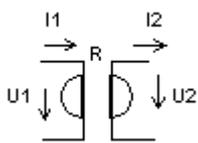


Рисунок 2. Обозначение гириатора на схеме

Ток и напряжение на входе и выходе гириатора связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= R \cdot I_2 \\ U_2 &= R \cdot I_1 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где R - коэффициент гирации, имеющий размерность сопротивления.

Будем интерпретировать выражение (8) следующим образом. В схеме замещения магнитной ветви имеется магнитный ток, равный производной магнитного потока $d\Phi/dt$. В магнитную ветвь включен магнитный конденсатор с дифференциальной емкостью C_m^d .

Таким образом, влияние катушки на магнитную ветвь учтено включением в магнитную ветвь источника напряжения, управляемого током катушки с коэффициентом управления N . Влияние магнитной ветви на катушку учтено включением вместо катушки источника напряжения, управляемого магнитным током с коэффициентом управления N .

Гириаторы играют важную роль в модели гириатора-конденсатора как преобразователи между областью электрической цепи и областью магнитной цепи. В последнее время появились работы, в которых описан гириаторно-конденсаторный подход моделирования магнитоэлектрических схем замещения [10]-[11].

Катушке (рис. 1) соответствует магнитоэлектрическая схема замещения, показанная на рис. 3.

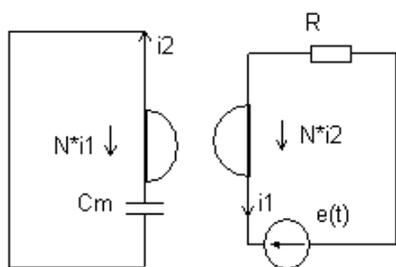


Рисунок 3. Схема замещения катушки (рис. 1)

Следует отметить, что в выражении (6) дифференциальная емкость магнитного конденсатора C_m^d не входит под знак производной по времени. Это дает основания рассматривать напряжение на магнитном конденсаторе как самостоятельную переменную состояния. Переменная состояния при коммутации не

должна изменяться скачком, то есть ее производная по времени всегда ограничена.

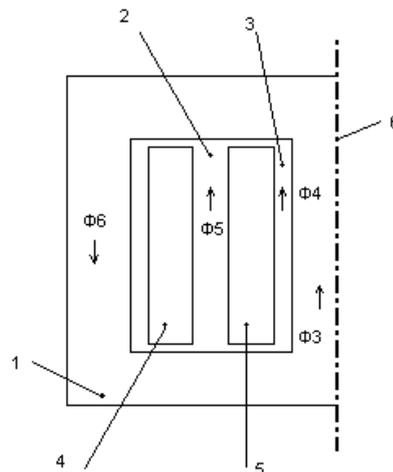
Покажем, что напряжение на магнитном конденсаторе не изменяется скачком. Энергия однородного магнитного поля W в объеме V определяется выражением: $W = V \cdot BH/2$. Тогда скорость изменения энергии магнитного поля – мощность P всегда ограничена:

$$P = \frac{dW}{dt} = \left[\frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} H + B \frac{dH}{dt} \right] \frac{V}{2} = \left[\mu^d \frac{dH}{dt} H + B \frac{dH}{dt} \right] \frac{V}{2}. \quad (10)$$

Следовательно, ограничены все члены выражения (10). Отсюда следует, что ограничено значение магнитного тока (6), а, следовательно, и значение du_{cm}/dt . То есть магнитное напряжение u_{cm} не может изменяться скачком. Уравнение (3) можно интерпретировать следующим образом. По магнитопроводу протекает «магнитный ток», значение которого равно производной по времени магнитного потока Φ (рис. 3).

Левая часть уравнения (8) интерпретируется как источник МДС, управляемый током катушки. Электрическая цепь содержит источник ЭДС $e(t)$, некоторое сопротивление R , и гириатор, управляемый магнитным током i_2 с коэффициентом гирации N (рис. 3).

В качестве примера применения рассмотренной схемы замещения с включенными магнитными конденсаторами с дифференциальной емкостью рассмотрим моделирование переходного процесса при включении однофазного трансформатора, показанного на (рис. 4).



1 – магнитопровод; 2 – зазор между обмотками (канал рассеяния). 3 – зазор между обмоткой и стержнем; 4 – первичная обмотка; 5 – вторичная обмотка; 6 – ось симметрии

Рисунок 4. Конструкция двухобмоточного однофазного трансформатора в разрезе:

МЭСЗ однофазного трансформатора представлена на рис. 5.

- линейные резистивные (R), индуктивные (L) и емкостные (C) элементы;
- независимые источники ЭДС (E) и тока (J), функционально зависящие от времени по заданному закону;
- зависимые источники ЭДС (E) и тока (J), управляемые током или напряжением любой ветви;
- нелинейные резистивные элементы с кусочно-линейными (RN), или гладкими характеристиками (Rn);
- диоды (D) и тиристоры (S), для которых учтен ряд важных параметров, не предусмотренных в существующих системах моделирования;
- ветвь ферромагнитного магнитопровода, в которой протекает магнитный ток, характеристика которой задана дифференциальной магнитной емкостью (Cm), зависящей от напряженности магнитного поля, причем резистивный элемент этой ветви отвечает за потери в стали;

В основу программного комплекса Colo положен метод переменных состояния с применением уравнений токов и напряжений Кирхгофа, полученных автоматически топологическими методами. Программный комплекс Colo разработан в системе Matlab [16].

Входные данные задаются в m-файле DataColo. Файл DataColo помещается в одну папку со всеми подпрограммами и основной программой Colo. Основной массив Param_ish в m-файле DataColo, в который заносится топология цепи и основные параметры элементов, формируется по следующим правилам:

- Каждая ветвь описывается отдельной строкой массива. Количество строк массива равно количеству ветвей b схемы;
- Каждая строка содержит шесть числовых параметров, разделенных пробелами или запятой. В конце строки ставится символ «точка с запятой» и троеточие;
- В каждой строке первый параметр – целое число задает номер ветви на схеме;
- Вторым параметром – целое число определяет номер узла, из которого исходит данная ветвь;
- Третьим параметром – целое число определяет номер узла, в котором заканчивается данная ветвь;
- Четвертым параметром строки определяет тип ветви.
- Пятый параметр строки определяет следующее: для пассивных линейных компонентов схемы – это величина сопротивления, индуктивности или емкости; для независимых источников ЭДС и тока этот параметр равен нулю; для элементов замещения нелинейных резисторов – это номер нелинейного элемента, дающий ссылку на заданную характеристику нелинейного элемента;
- Шестым параметром определяет начальные условия переменных состояния. Для особой «дифференциальной» магнитной ветви этот параметр задает начальное значение магнитного потока (остаточная намагниченность). Для остальных ветвей этот параметр равен

нулю.

Математическая модель, положенная в основу программного комплекса Colo, и сам программный комплекс модифицированы авторами данной работы введением нового элемента – гиратора.

Во входных данных массива Param_ish файла DataColo каждой ветви с гиратором соответствует строка, в которой четвертый параметр строки определяет тип ветви (G). Пятый параметр строки определяет номер управляющей ветви. Шестым параметром строки определяет коэффициент гирации. Гираторы определяются только в магнитных цепях. В электрических цепях магнитоэлектрических схем замещения гираторы специально во входных данных не задаются. Они определяются программой автоматически по данным гираторов магнитной цепи.

С помощью модифицированного программного комплекса Colo выполнено моделирование переходного процесса при включении трехфазного пяти-стержневого трансформатора. МЭСЗ трансформатора представлена на рис. 6-8. Все магнитные токи обозначены символом “ i ” с номером ветви.

Результаты моделирования представлены на рис. 9-10. На рис. 9 в крупном масштабе показано начало переходного процесса, а на рис. 10 в более мелком масштабе показано продолжение переходного процесса. Рис. 10 показывает, что переходный процесс при включении мощного трансформатора весьма длительный, поэтому сокращение времени моделирования является ценной особенностью модифицированного программного комплекса.

V. ВЫВОДЫ

В модифицированном методе расчета переходных электромагнитных процессов на основе магнитоэлектрических схем замещения, используются гираторно-конденсаторные модели. Составленная компьютерная программа для расчета переходного процесса в однофазном трансформаторе, показала адекватность метода.

Показанный пример применения модифицированного программного комплекса Colo для расчета переходного процесса в трехфазном трансформаторе показал лучшую наглядность при составлении магнитоэлектрических схем замещения, а также показал сокращение времени компьютерного моделирования.

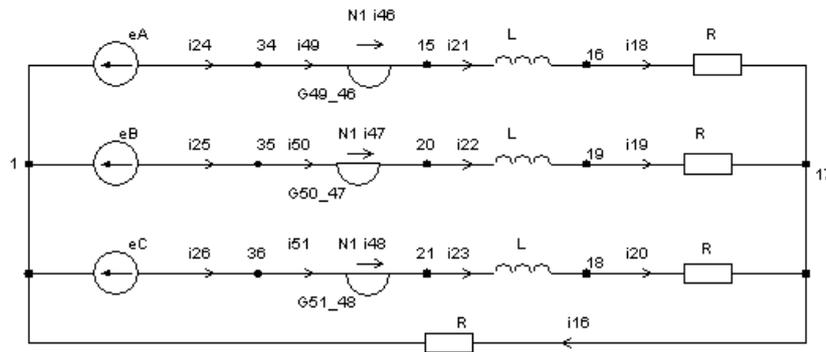


Рисунок 6. Первичная обмотка с трехфазным источником ЭДС.

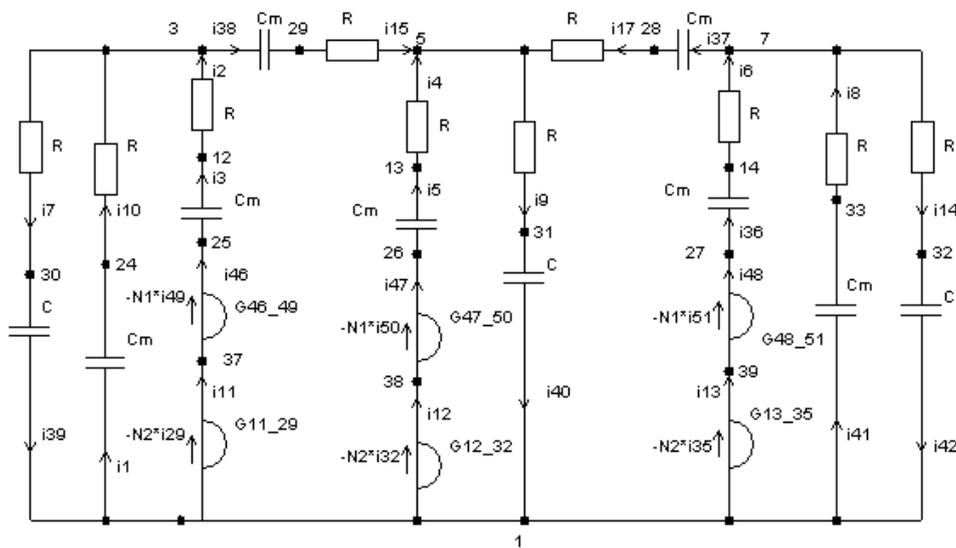


Рисунок 7. Магнитная цепь

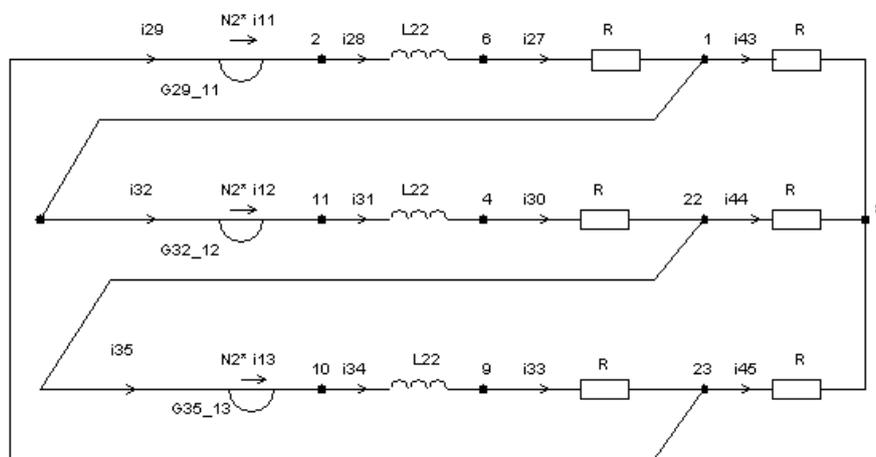


Рисунок 8. Вторичная обмотка с нагрузкой

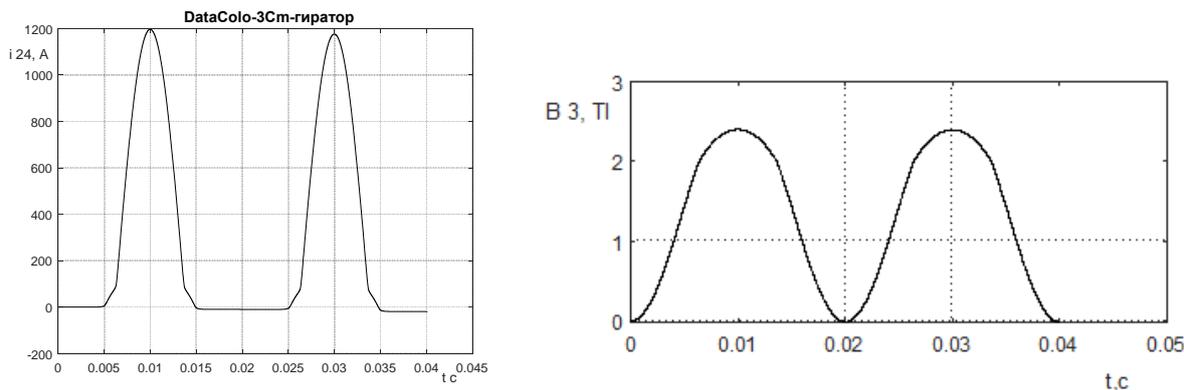


Рисунок 9. Начало переходного процесса тока первичной обмотки i_{24} и магнитной индукции B_3 в стержне фазы А

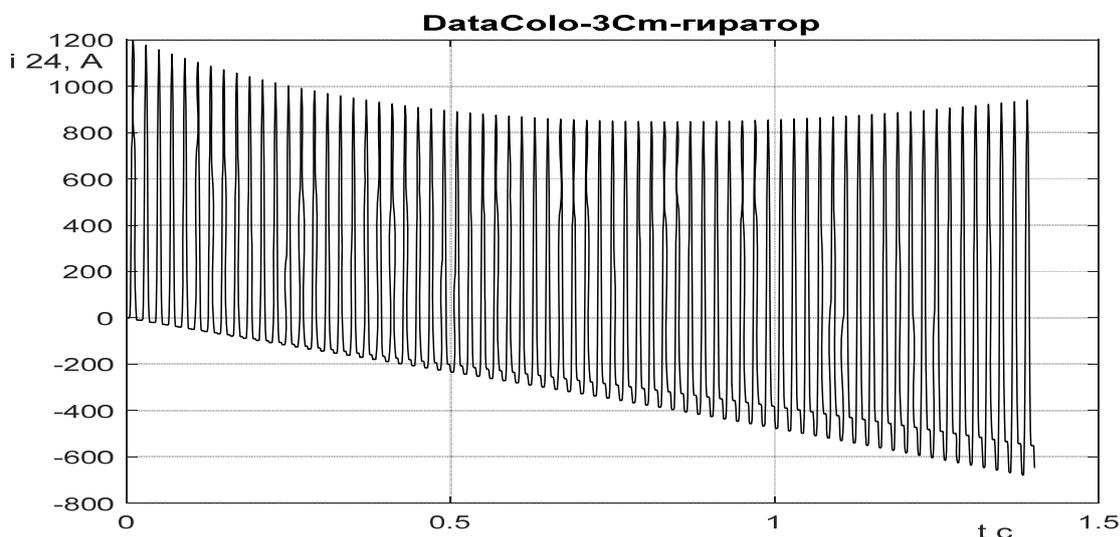


Рисунок 10. Переходный процесс тока первичной обмотки и магнитной индукции в стержне фазы А

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тиховод С.М. Модификация магнитоэлектрических схем замещения электромагнитных устройств для анализа переходных процессов / С.М. Тиховод // Электричество . – 2014. – №2 . – С. 53-60. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21094678>
- [2] Тиховод С. М. Моделювання перехідних електромагнітних процесів в трансформаторах на основі магнітоелектричних схем заміщення: Підручник / С.М. Тиховод. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 94 с.
- [3] Чахмахсазян Е.А. Машинный анализ интегральных схем. Вопросы теории и программирования / Е.А. Чахмахсазян, Ю.Н. Бармаков, А.Э. Гольденберг. – М.: Советское радио, 1974. – 272 с.
- [4] Чуа Л.О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы / Л. О. Чуа, Пен-Мин. Лин; [пер. с англ.]. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
- [5] Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 9-е изд., электрон. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 636 с.
- [6] Bansal R.K. Fundamentals of Numerical Methods. Oxford: Alpha Science International Ltd., 2018. — 574 p. — ISBN 1783323604.
- [7] Тиховод С. М. Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С.М. Тиховод //

- Технічна електродинаміка . – 2008. – №3, С. 16-23.
- [8] Шакиров М.А. Магнітоелектрические схемы замещения катушек индуктивности и трансформаторов / М.А. Шакиров // Электричество. – 2003. – №11. – С. 34-45.
- [9] Шакиров М.А. Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнітоелектрических схем замещения / М.А. Шакиров // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 15-27.
- [10] Guadalupe G Gonzalez and Mehrdad Ehsani «Power-Invariant Magnetic System Modeling». International Journal of Magnetism and Electromagnetism ,2018. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5068/6512. ISSN 2631-5068
- [11] Mathieu Lambert; Jean Mahseredjian; Manuel Martı́nez-Duró; Frédéric Siroi. (2015). «Magnetic Circuits Within Electric Circuits: Critical Review of Existing Methods and New Mutator Implementations». IEEE Transactions on Power Delivery . 30 (6): 2427–2434. DOI : 10.1109 / TPWRD.2015.2391231
- [12] Д.К. Максвелл. Статьи и речи. – М.: Наука. – 1968.– с. 312.
- [13] Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в электромагнитных устройствах на основе магнітоелектрических схем замещения с магнитными конденсаторами / С.М. Тиховод, И. Токмаков // Електротехніка та електроенергетика . – 2013. – № 1 . – С. 5-12. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee_2013_1_3.pdf
- [14] B.D.H. Tellegen. The gyrator a new electric network element / Tellegen B.D.H. // Philips Res.Rep. –1948. –# 3.-p. 81-101.
- [15] Тиховод С.М. Расчет индуктивностей обмоток трансформатора, обусловленных магнитными потоками в воздухе / С.М. Тиховод, Г.Н. Романиченко, И.О. Афанасьева // Електромеханічні і енергозберігаючі системи . – №3. – С. 149-154.
- [16] Ануфриев И. Е., МАТЛАВ 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2020

ГІРАТОРНО-КОНДЕНСАТОРНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

- ПОДУС О.Р. Студент Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: e-mail:koldun290@gmail.com;
- ПАТАЛАХ Д.Г. Аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- ТИХОВОД С. М. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: stikhovod@gmail.com.

Мета роботи. Розробка магнітоелектричних схем заміщення, що використовують гіраторно-конденсаторні моделі

Методи дослідження. Числові методи розв'язку диференціальних рівнянь стану, математичний апарат матричної алгебри, комп'ютерне програмування та методи теорії електричних кіл.

Отримані результати. В результаті модифікації відомого методу розрахунку перехідних електромагнітних процесів на основі магнітоелектричних схем заміщення, розроблений метод, який використовує гіраторно-конденсаторні моделі. На підставі розробленого методу складена комп'ютерна програма для розрахунку перехідного процесу в однофазному трансформаторі, яка показала адекватність методу. Модифікований універсальний програмний комплекс моделювання магнітоелектричних схем заміщення Solo. Показаний приклад застосування модифікованого програмного комплексу Solo для розрахунку перехідного процесу в трифазному трансформаторі. Даний приклад показав кращу наочність при складанні магнітоелектричних схем заміщення, а також скорочення часу комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна. Виконано подальший розвиток методів розрахунку електромагнітних процесів на основі нелінійних магнітоелектричних схем заміщення. Модифікована математична модель, яка положення в основу універсального програмного комплексу Solo шляхом введення нового елемента - гіратора, чим досягнута сис-

темність застосування гіраторно-конденсаторного методу магнітоелектричних схем заміщення.

Практична цінність. Запропонована модифікація універсального програмного комплексу Colo дозволяє скоротити час розробки моделі, підготовки вихідних даних і скоротити процесорний час моделювання складних нелінійних електромагнітних пристроїв.

Ключові слова: перехідний процес; трансформатори; магнітоелектричні схеми заміщення; числові методи; схемна модель; магнітні конденсатори; гіратори

GYRATOR-CAPACITOR METHOD FOR MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES BASED ON MAGNETOELECTRIC SUBSTITUTION CIRCUITS

- PODUS A. Student of National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: koldun290@gmail.com;
- PATALAKH D. Postgraduate student of National University " Zaporizhzhia Polytechnic ", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- TYKHOVOD S. Doctor technical sciences, Assoc. Prof., Chief of the department of the Theoretical and general electronics, National University " Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine, e-mail: stikhovod@gmail.com.

Purpose. Development of magnetolectric substitution circuits using gyrator-capacitor models

Methodology. Numerical methods for solving differential equations of state, mathematical apparatus of matrix algebra, computer programming and methods of electrical circuit theory.

Findings. As a result of modification of the known method of calculation of transient electro-magnetic processes on the basis of magnetolectric substitution circuits, the method using gyrator-capacitor models is developed.

On the basis of the developed method the computer program for calculation of transient process in the single-phase transformer which showed adequacy of a method is made. The universal software complex for modeling magnetolectric substitution circuits Colo was modified. An example of using a modified Colo software complex to calculate a transients in a three-phase transformer is shown. This example demonstrates additional clarity of compiled magnetolectric substitution circuits and reduction of the computer time modeling.

Originality. Further development of methods for calculating electromagnetic processes based on nonlinear magnetolectric substitution circuits was carried out. The mathematical model, which is taken as a principle of the universal Colo software complex, was modified by the way of a new element application - a gyrator. It is allow to achieve the systemic application of the gyratory-capacitor method of magnetolectric substitution circuits.

Practical value. The proposed modification of the universal software complex Colo allows to reduce the time of model development, preparation of initial data and to reduce the processor time of modeling of complex nonlinear electromagnetic devices.

Keywords: transient; transformers; magnetolectric substitution circuits; numerical methods; schematic model; magnetic capacitors; gyrators.

REFERENCES

- [1] Tikhovod, S.M. (2014). Modifikatsiya magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya elektromagnitnykh ustroystv dlya analiza perekhodnykh protsessov. *Elektrichestvo*. No 2, 53-60. <http://elibrary.ru/item.asp?id=2109467>
- [2] Tikhovod, S.M. (2017). Modelyuvannya perekhodka elektromagnitnykh protsessiv v transformatorakh na osnovi magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya: pdruchnik. Zaporizhzhya: ZNTU, 94.
- [3] Chakhmakhshyan, E.A., Barmakov, Yu.N., Goldenberg, A.E. (1974). Mashinnyy analiz integralnykh skhem. voprosy teorii i programmirovaniya. Moscow: Sovetskoe radio, 272.
- [4] Chua, L.O. Pen-Min. (1980). Mashinnyy analiz elektronnykh skhem: algoritmy i vychislitelnye metody. Moscow, Energiya, 640.
- [5] Bakhvalov, N. S., Zhidkov, G. M., Kobelkov, N. P., (2020). Chislennyye metody. 9-e izd., elektron, Moskva : laboratoriya znaniy, 636.
- [6] Bansal, R.K. (2018). Fundamentals of numerical methods. Oxford: alpha science international ltd, 574
- [7] Tikhovod, S.M. (2008). Sistema kompyuternogo modeli-rovaniya dinamicheskikh protsessov v neline-

- jnykh magnitoelektricheskikh tsepyakh. Tekhnichna elektrodinamka, No 3, 16-23.
- [8] Shakirov, M.A. (2003). Magnitoelektricheskie skhemy zamescheniya katushek induktivnosti i transformatorov. *Elektrichestvo*, No 11, 34-45.
- [9] Shakirov, M.A. (2005). Analiz neravnomernosti raspredeleniya magnitnykh nagruzok i poter v transformatorakh na osnove magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya. *Elektrichestvo*, No 11, 15-27.
- [10] Guadalupe G Gonzalez and Mehrdad Ehsani «Power-Invariant Magnetic System Modeling». *International Journal of Magnetism and Electromagnetism*, 2018. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5068/6512. ISSN 2631-5068
- [11] Mathieu Lambert; Jean Mahseredjian; Manuel Martí'nez-Duró; Frédéric Siroi. (2015). «Magnetic Circuits Within Electric Circuits: Critical Review of Existing Methods and New Mutator Implementations». *IEEE Transactions on Power Delivery*. 30 (6): 2427–2434. DOI : 10.1109 / TPWRD.2015.2391231
- [12] Максвелл, Д.К. (1968). *Стати і речі*. Moscow. Nauka, 312.
- [13] Tikhovod, S.M., Tokmakov, I. (2013). Modelirovanie perekhodnykh protsessov v elektromagnitnykh ustrojstvakh na osno-ve magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya s magnitnymi kondensatorami. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, No 1, 5-12. rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee_2013_1_3.pdf
- [14] B.D.H. Tellegen. (1948). The gyrator a new electric network element. *Philips Res.Rep.* No 3, 81-101.
- [15] Tikhovod, S.M., Romanichenko, G.N., Afanaseva, I.O. Raschet induktivnostej obmotok transformatora, obuslovlennykh magnitnymi potokami v vozdukh. *Elektromekhanichn energozbergayuch sistemi*. No 3. 149-154.
- [16] Anufriev, I. E., Smirnov, A. B., Smirnova, E. N. (2005). *Matlab 7*. SPb.: bkhv-Peterburg, 1104 s.