

УДК 621.314.322.001.6

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОЛО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТРАНСФОРМАТОР-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**

Тиховод С.М., к.т.н.

*Запорожский национальный технический университет*

Тел. (061)212-15-54

***Аннотация*** –рассмотрены особенности моделированию электромагнитных процессов программного комплекса Solo. Показан пример моделирования с помощью программного комплекса Solo электромагнитных процессов в электротехнической системе «трансформатор – преобразователь» и выработки рекомендации по оптимизации конструкции трансформатора.

***Ключевые слова*** – моделирование, электромагнитные процессы, трансформаторы, преобразователи.

*Постановка проблемы.* Одними из важных частей современного АПК являются электротехнические системы, включающие трансформаторы, линии электропередачи, преобразовательные устройства и различные потребители энергии.

*Анализ последних исследований.* В последнее время все более возрастает научный интерес к моделированию переходных и установившихся электромагнитных процессов в многообразии составных частей электротехнических систем. Современное компьютерное моделирование позволяет существенно сократить финансовые затраты и время на дорогостоящее физическое моделирование. При этом возможно исследование электромагнитных процессов в отдельных элементах магнитной и электрической частей объектов электротехнической системы при учете их реальных конструктивных особенностей и взаимодействия объектов в системе. С помощью моделирования можно проанализировать работу не только отдельных компонентов, входящих в комплекс «трансформатор – преобразователь», но и выявить новые особенности, которые появляются в сложной системе.

*Формулирование цели статьи.* Цель работы – показать примеры моделирования с помощью разработанного автором программного

комплекса Solo электромагнитных процессов в электротехнической системе «трансформатор – преобразователь» и выработке рекомендации по оптимизации конструкции трансформатора.

*Основная часть.* Трансформатор, или другое электромагнитное устройство, включенное в электрическую цепь, можно представить единой магнитоэлектрической схемой замещения [1]. В такой схеме замещения имеются как электрические ветви, так и магнитные ветви. В электрических ветвях протекают электрические токи, в магнитных ветвях протекают магнитные потоки (магнитные ветви). Для простых устройств (как например однофазные трансформаторы) магнитоэлектрические схемы замещения, а также уравнения и компьютерные программы могут быть разработаны вручную индивидуально. Однако даже для простейшего трехфазного трансформатора магнитоэлектрическая схема замещения становится такой сложной, что составление уравнений вручную и разработка индивидуальных компьютерных программ становится затруднительной задачей даже для квалифицированного специалиста. Математические уравнения, описывающие электромагнитные процессы в таких комплексах, ввиду их сложности должны формироваться автоматически. Для автоматизированного составления и решения уравнений электромагнитного состояния электротехнической системы разработана математическая модель, на основании которой разработан программный комплекс Solo [2].

Для анализа магнитоэлектрической цепи с помощью программного комплекса Solo предварительно задается набор элементов, входящих в цепь, их параметры и структуру соединений элементов между собой. В результате расчета получаются зависимости от времени токов (магнитных потоков) и напряжений всех элементов, входящих в цепь.

В основу разработанного программного комплекса Solo положен метод переменных состояния с применением уравнений токов и напряжений Кирхгофа, полученных топологическими методами. При этом достигается единообразие составления уравнений состояния для магнитоэлектрических схем замещения. Достигается удобство применения управляемых источников напряжения и тока, которые широко используются в магнитоэлектрических схемах замещения при описании взаимодействия электрических токов и магнитных потоков.

Для ввода исходной информации предусмотрена следующая процедура:

- составление магнитоэлектрической схемы замещения электромагнитного устройства и ее вычерчивание;
- нумерация ветвей и проставление стрелок положительного направления токов (магнитных потоков);
- нумерация узлов от первого до максимального номера ведется аналогично нумерации ветвей.

Входные данные задаются в m-файле DataColo. Массив, в который заносится топология цепи и основные параметры элементов, Param\_ish формируется по следующим правилам:

- каждая ветвь описывается отдельной строкой массива;
- каждая строка содержит шесть числовых параметров;
- в каждой строке первый параметр – целое число задает номер ветви на схеме;
- второй параметр – целое число определяет номер узла, из которого исходит данная ветвь;
- третий параметр – целое число определяет номер узла, в котором заканчивается данная ветвь;
- четвертый параметр строки определяет тип ветви. В программе Colo предусмотрены следующие возможные типы ветвей, имеющие свое обозначение: R, L, C – ветвь с линейным резистивным, индуктивным или емкостным элементом; D, S – ветвь, содержащая диод или тиристор; RT – ветвь с линейным резистивным элементом, изменяющим свое сопротивление скачком в момент времени t; E, J – независимый или управляемый источник ЭДС или тока; En, Rn – ЭДС и сопротивление схемы замещения нелинейного резистора, задаваемого сглаженной с помощью сплайнов ВАХ;
- пятый параметр строки определяет: для пассивных линейных компонентов схемы – это величина сопротивления, индуктивности или емкости; для элементов замещения нелинейных резисторов (En, Rn) – это номер разновидности нелинейного элемента, дающий ссылку на заданную характеристику нелинейного элемента;
- шестой параметр определяет начальные условия переменных состояния.

Рассмотрим моделирование электромагнитных процессов в трехфазном трехстержневом трансформаторе, который питает тиристорный выпрямитель [3] (рис. 1).

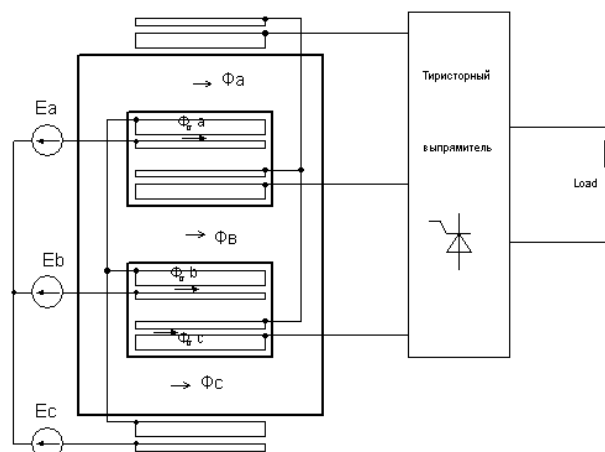


Рис. 1. Трехфазный трансформатор с тиристорным выпрямителем.

Моделювання проведемо в різних режимах, в тому числі і при короткому замиканні одного з тиристорів. Выпрямитель, зібраний по схемі Ларионова, навантажено на активно-індуктивну навантаження. Исследуем електромагнітний перехідний процес при підключенні преобразувача до джерела живлення, а також при виникненні короткого замикання. Моделювання проведемо при різних значеннях магнітного опору каналів розсіяння трансформатора і дадим рекомендації по оптимізації конструкції трансформатора. Схема заміщення, згідно якої проводиться моделювання, приведена на рис. 2-5. Для єдинообразия всі електричні токи і магнітні потоки позначені символом «i».

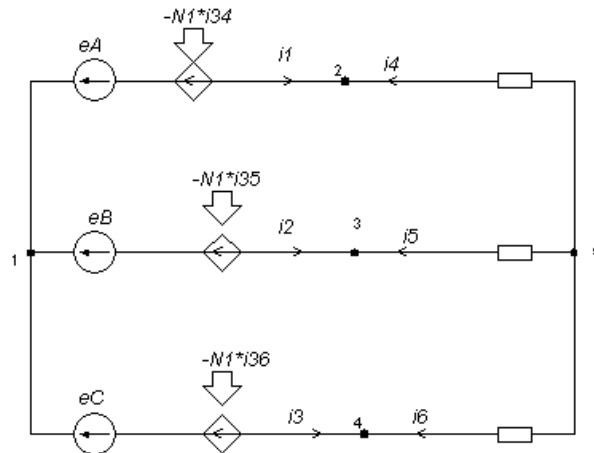


Рис. 2. Схема заміщення первичної обмотки трифазного трансформатора, підключеної до трифазного джерела напруги.

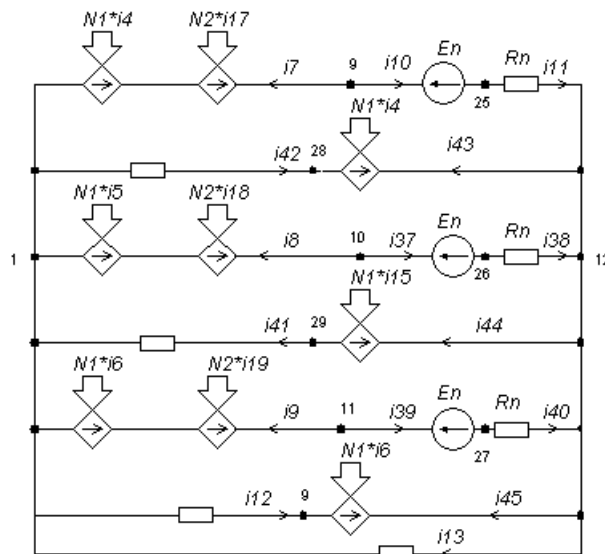


Рис. 3. Схема заміщення магнітної системи трифазного трансформатора.

На схемі  $N_1$ ,  $N_2$  – числа витків первичних і вторичних обмоток трансформатора. Магнітний опір повітря для магнітних потоків розсіяння урахувано включенням лінійних опорів в

магнитну цепь (рис. 3, ветви с номерами 12, 13, 41,42). Производные магнитных потоков вычисляются с помощью использования дифференцирующей цепи, показанной на рис. 5. Тиристоры (на рис. 4  $VS_1$ - $VS_6$ ) в программе Solo моделируются по методике, описанной в [3]. Поскольку первичная обмотка является внешней обмоткой, то ее витки пересекает как магнитный поток стержня, так и магнитный поток рассеяния. Поэтому в схему замещения первичной обмотки каждой фазы (рис. 2) включен источник напряжения, управляемый производной магнитного потока стержня и магнитного потока рассеяния.

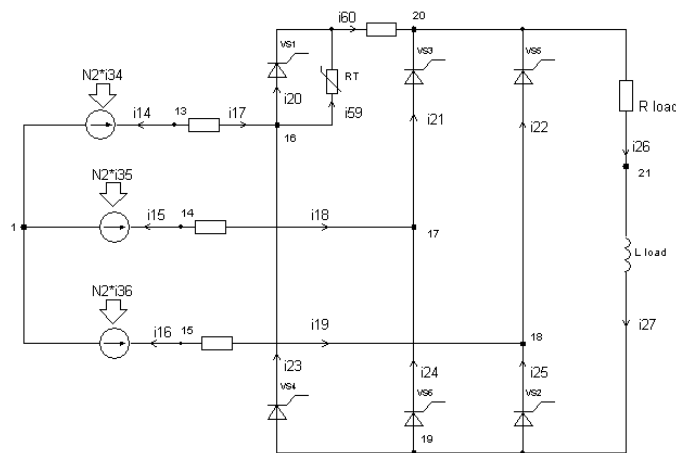


Рис. 4. Схема замещения вторичной обмотки, подключенной к тиристорному выпрямителю.

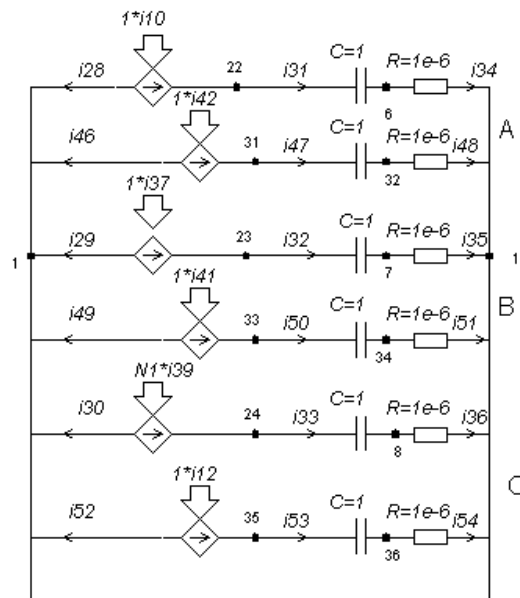


Рис. 5. Схема дифференцирующих цепочек.

Вторичная обмотка является внутренней обмоткой, и ее витки пересекает только магнитный поток стержня. Поэтому в схему замещения вторичной обмотки каждой фазы (рис. 4) включен

источник напряжения, управляемый производной магнитного потока соответствующего стержня.

На характер переходного процесса в значительной степени влияет значения магнитного сопротивления рассеяния трансформатора  $R_{12}$ ,  $R_{41}$ ,  $R_{42}$ . Эти сопротивления можно рассчитать, зная размеры первичной и вторичной обмоток. Для этого разработана специальная компьютерная программа по методике, изложенной в работе [4]. При увеличении ширины каналов рассеяния трансформатора эти сопротивления уменьшаются.

Проведем моделирование электромагнитных процессов при значениях магнитного сопротивления каналов рассеяния  $2.5 \cdot 10^7$  1/Гн (узкие каналы). На рис. 4 показано, что параллельно тиристоры  $VS_1$  (ветвь 20) подключен резистивный элемент типа РТ, который может скачком изменять свое сопротивление в заданный момент времени  $\tau$ . Если задать значение сопротивления резистора РТ до коммутации  $10^6$  Ом, а после коммутации –  $10^4$ , то этим можно моделировать пробой тиристора  $VS_1$  и проследить процессы, вызванные этой аварией.

Если значение  $\tau$  больше времени моделирования, то получим безаварийный режим. В противном случае в момент времени  $\tau$  начнется аварийный режим. На рис. 6 показано изменение тока тиристора  $VS_1$  после подключения питания к трансформатору ( $\tau=0,5$  с). Рис. 6 показывает, что переходный процесс, вызванный основным магнитным потоком трансформатора длится около 0,4 с. Явление коммутации тиристоров проявляется слабо (малая индуктивность рассеяния трансформатора). При задании значения  $\tau=0,385$  с выполняется моделирование аварийного режима.

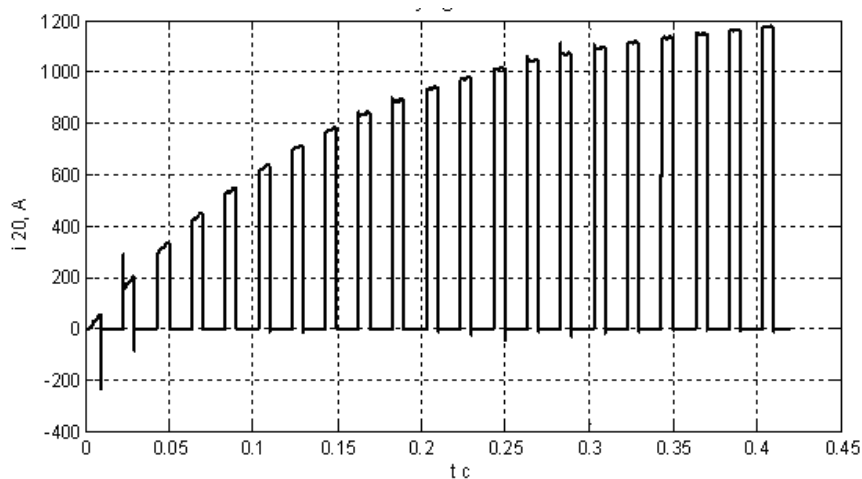


Рис. 6. Временная зависимость тока тиристора  $VS_1$  (безаварийный режим).

На рис. 7 показано изменение тока тиристоры  $VS_1$  в аварийном режиме.

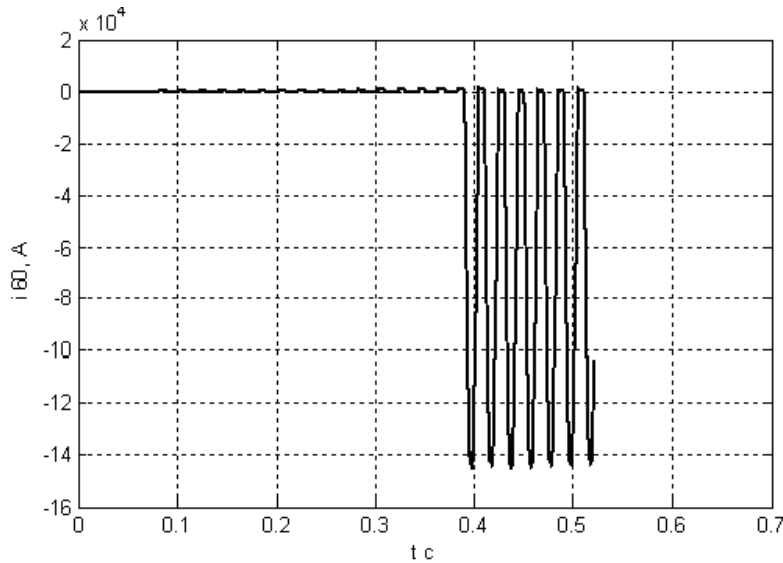


Рис. 7. Временная зависимость тока тиристора  $VS_1$  (аварийный режим).

Анализ графика, показанного на рис. 7 показывает, что при заданных параметрах трансформатора токи тиристоры аварийно возрастают до 140 кА в течение периода проводимости одного тиристора, что является недопустимым. В течение времени развития аварийных токов автоматика защиты от коротких замыканий сработать не может.

Для того чтобы ограничить аварийные токи, трансформаторы для преобразовательных устройств проектируют с повышенной индуктивностью рассеяния. На рис. 8 показана зависимость магнитной индукции в стержне. Магнитопровод входит в насыщение.

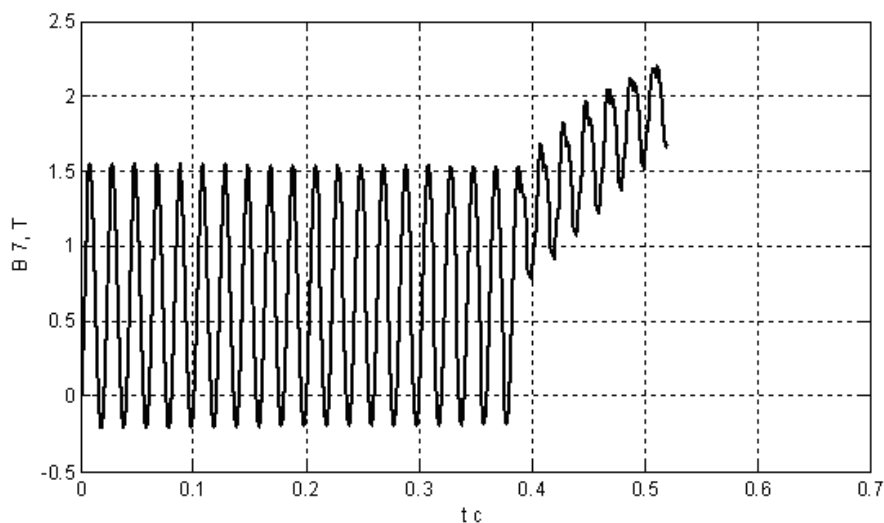


Рис. 8. Временная зависимость магнитной индукции в стержне.

Зададим значения магнитного сопротивления каналов рассеяния  $2.5 \cdot 10^6$  1/Гн (широкие каналы) и проведем моделирование. На рис. 9

показано изменение тока тиристора  $VS_1$  после подключения питания к трансформатору в безаварийном режиме.

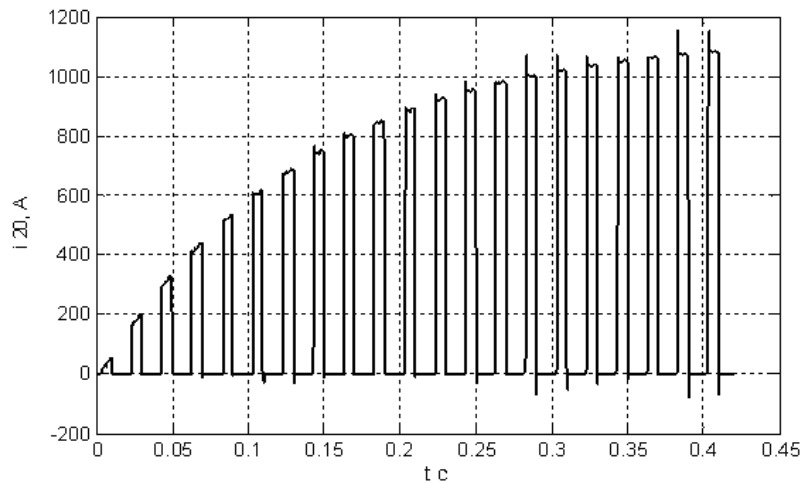


Рис. 9. Временная зависимость тока тиристора  $VS_1$  (безаварийный режим).

Индуктивность рассеяния несколько ограничивает установившийся ток. Стало заметно проявление коммутационных процессов тиристора. Это является отрицательной стороной повышения индуктивности рассеяния трансформатора. Однако при коротком замыкании тиристора повышенная индуктивность рассеяния ограничивает аварийные токи и не допускает вхождение магнитопровода в насыщение.

На рис. 10 показано изменение тока тиристора  $VS_1$  в аварийном режиме. Видно, что максимальный аварийный ток не превышает 16,5 кА, что дает возможность срабатывания защиты и предотвращение развития аварии.

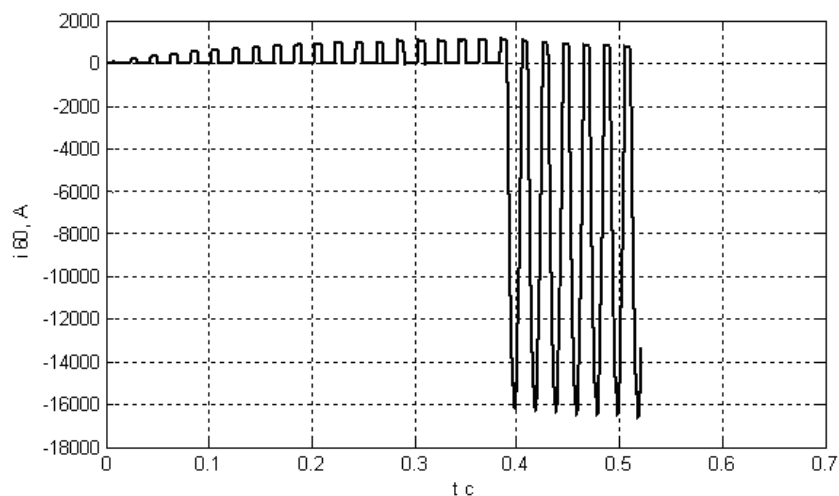


Рис. 10. Временная зависимость аварийного тока тиристора  $VS_1$ .

На рис. 11 показано, что магнитопровод при аварии в насыщение не входит.



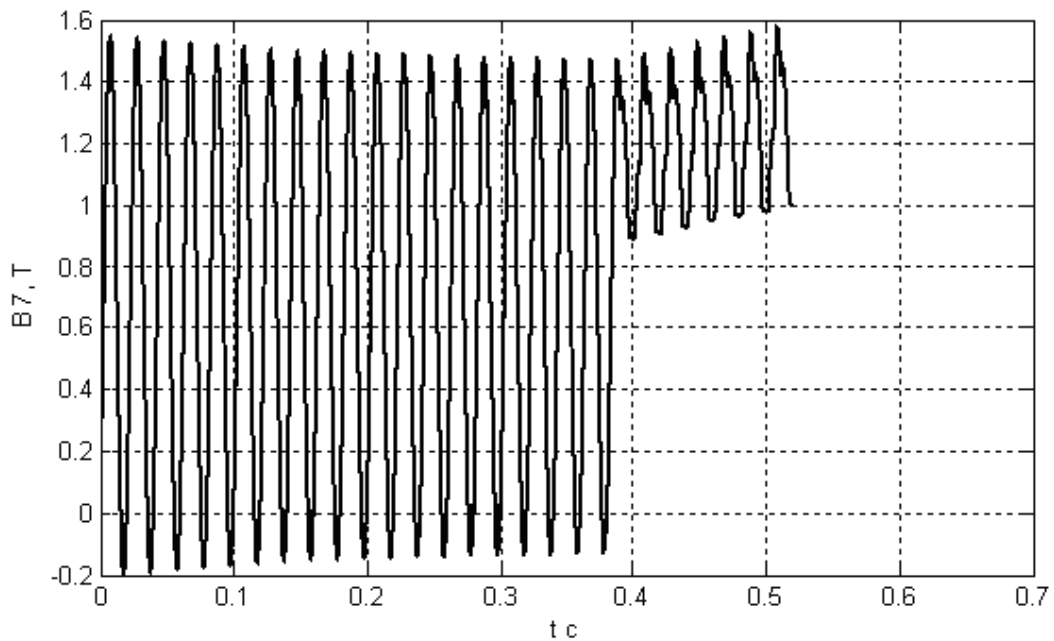


Рис. 11. Временная зависимость магнитной индукции в стержне.

*Выводы.* 1. Программный комплекс Solo позволяет проводить моделирование динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях, содержащих тиристоры и диоды. Потоки рассеяния учитываются с помощью линейных магнитных сопротивлений без использования индуктивностей рассеяния.

2. Показано, что переходный процесс в значительной степени зависит от значений индуктивностей рассеяния, связанных с магнитными потоками вне магнитной системы, а также со значениями магнитных сопротивлений каналов рассеяния и воздушных зазоров.

3. Выбор оптимального значения магнитных сопротивлений каналов рассеяния и воздушных зазоров позволяет ограничить аварийные токи так, чтобы могла сработать защита, предотвращающая развитие аварии.

#### Литература

1. Шакиров М.А. Расчет несимметричных режимов работы трансформаторов с учетом намагничивания стали / М.А.Шакиров // Электричество. – 2006. – № 6. – С. 21-33.

2. Тиховод С.М. Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях/ С.М. Тиховод // Технічна електродинаміка. –2008. – №3. – С.16-23.

3. Тиховод С.М. Разработка компьютерной программы моделирования магнитоэлектрических цепей, содержащих тиристоры/ С.М. Тиховод // Технічна електродинаміка. – 2009. – №3. – С.9-13.

4. *Тиховод С.М.* Расчет индуктивностей обмоток трансформатора, обусловленных магнитными потоками в воздухе / *С.М. Тиховод, Г.Н. Романиченко, И.О.Афанасьева*// Доповіді учасників XIII міжнародній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» науково-виробничого журналу "Електромеханічні і енергозберігаючі системи". – №3. – С.149-154.

**ВИКОРИСТАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ  
МОДЕЛІ СОЛО ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ  
ТРАНСФОРМАТОР-ПЕРЕТВОРЮВАЧ**

Тиховод С.М.

*Анотація*

Розглянуто особливості моделювання електромагнітних процесів програмного комплексу Colo. Показано приклад моделювання за допомогою програмного комплексу Colo електромагнітних процесів в електротехнічній системі «трансформатор – перетворювач» і надані рекомендації з оптимізації конструкції трансформатора.

**USE A GENERIC COMPUTER MODEL COLO FOR THE STUDY OF DYNAMIC COLO ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE SYSTEM TRANSFORMER-CONVERTER**

S. Tihovod

*Summary*

The features of the modeling electromagnetic processes software package Colo. The example of simulation using the software package Colo electromagnetic processes in the electrical system of "transformer – converter" and develop recommendations for optimizing the design of the transformer.