

УДК 621.313.2.001.24

**Пустоветов Михаил Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент, директор НИИЦ «Криотранс-энерго» Ростовского государственного университета путей сообщения.  
E-mail: [mgsn2006@rambler.ru](mailto:mgsn2006@rambler.ru)  
Область научных интересов: электрический привод, компьютерное моделирование в электротехнике.

**РАСШИРЕНИЕ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТРЁХФАЗНОГО  
ДВУХОБОМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДО  
ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
СХЕМЫ «ЗИГЗАГ»**

М.Ю. Пустоветов

Ростовский государственный университет  
путей сообщения  
E-mail: [mgsn2006@rambler.ru](mailto:mgsn2006@rambler.ru)

Актуальность работы обусловлена широким использованием в современных схемах питания силовых полупроводниковых преобразователей трёхфазных фазосдвигающих трансформаторов, в том числе со схемой соединения обмотки «зигзаг». В связи с этим возникает необходимость в разработке компьютерных мо-

делей таких трансформаторов. Цель работы – предоставить на основе результатов моделирования тестовых режимов подтверждение корректности отражения в предложенной модели трансформатора сильной магнитной связи между фазами за счёт наличия единого магнитопровода; рассказать о способе расширения ранее разработанной компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора до трёхобмоточного, а также до возможности моделирования схемы «зигзаг». Были использованы такие методы, как имитационное компьютерное моделирование трёхфазного трансформатора на основе сочетания схемотехнического и операционного принципов составления модели при использовании визуальной среды проектирования. На основе результатов моделирования тестовых режимов подтверждена корректность отражения в разработанной математической и компьютерной модели трансформатора сильной магнитной связи между фазами за счёт наличия единого магнитопровода. Описан алгоритм получения на основе компьютерной модели двухобмоточного трёхфазного трансформатора модели трансформатора с тремя обмотками и далее трансформатора со вторичной обмоткой, соединённой по схеме «зигзаг». Приведены результаты моделирования напряжений для трансформатора  $D/Z - 0$ , компьютерная модель которого построена на основе  $D/Y/Y - 1 - 11$ . Разработанный способ получения математической и компьютерной модели трансформатора со схемой соединения обмоток «зигзаг» позволяет получать нестандартные группы соединения при схеме «неравноплечий зигзаг». Возможен учёт нелинейности кривой намагничивания. Целесообразно использование способа при формировании моделей многообмоточных трёхфазных трансформаторов, предназначенных для питания многопульсных выпрямительно-инверторных преобразователей и преобразователей частоты на основе многоуровневых инверторов.

**Ключевые слова:** Трёхфазный трансформатор с единым магнитопроводом, компьютерная модель, тестовый режим, трёхобмоточный трансформатор, схема «зигзаг», многопульсный выпрямитель, многоуровневый инвертор, группа соединения обмоток по часовой системе обозначений.

В [1, 2] опубликованы уравнения математической модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым магнитопроводом, позволяющие моделировать все 12 стандартных групп соединений при схемах соединений обмоток «треугольник» и «звезда» [3]. В [2] дан пример имитационной компьютерной модели, составленной в OrCAD [4–7] по приведённым уравнениям.

К допущениям, принятым в вышеупомянутой математической модели, следует отнести учёт потерь в стали трансформатора путём использования в ветви намагничивания каждой фазы последовательного соединения главной индуктивности и активного сопротивления, на котором и выделяются суммарные потери в стали без разделения на составляющие от вихревых токов и гистерезиса, что автор счёл оправданным ввиду отсутствия в большинстве практических случаев исходных данных для более подробного описания. Таким образом, имеем вариант учёта потерь в стали, близкий по классификации, принятой в [8] к понятию «для процесса намаг-

ничивания в режиме установившихся вихревых токов». Более тонкий учёт потерь в стали с разделением на составляющие и «для процесса намагничивания магнитопровода с учетом конечного времени установления вихревых токов» по классификации [8] может быть реализован при использовании в математической модели трансформатора описания ветви намагничивания согласно [8, рис. 1–9, в] и введения параллельно ветви намагничивания ветви Т-образной схемы замещения, отвечающей за гистерезис, как предложено в [9] для описания трехфазного асинхронного двигателя.

Эффект вытеснения тока в проводниках трансформатора в [1, 2] не учитывается.

В компьютерной модели трансформатора [2] доступна опция учета насыщения магнитной цепи по пути замыкания основного магнитного потока за счет использования в каждой фазе безгистерезисной кривой намагничивания [10].

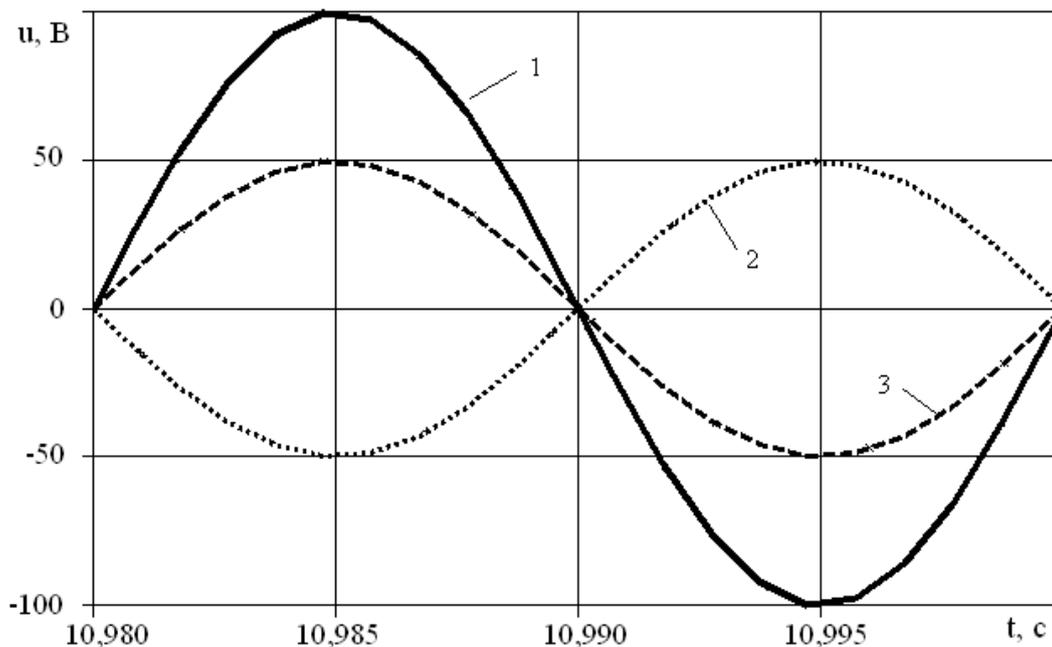
Паразитные емкости трансформатора в моделях [1, 2] не рассматриваются. Если в их рассмотрении возникнет необходимость, например при питании от импульсного источника напряжения, то, принимая описание паразитных емкостей в виде сосредоточенных элементов схемы замещения [8], учитывая схемотехнический подход при составлении компьютерной модели [2], нетрудно осуществить присоединение этих емкостей к соответствующим выводам.

Корректность учёта электромагнитной связи обмоток фаз трансформатора в модели [1, 2] подтверждается [11] успешным прохождением тестов, предложенных в [12] учёными Института энергетики Академии наук Молдовы В.А. Бошнягой и В.М. Суловым в порядке конструктивной критики работы [1].

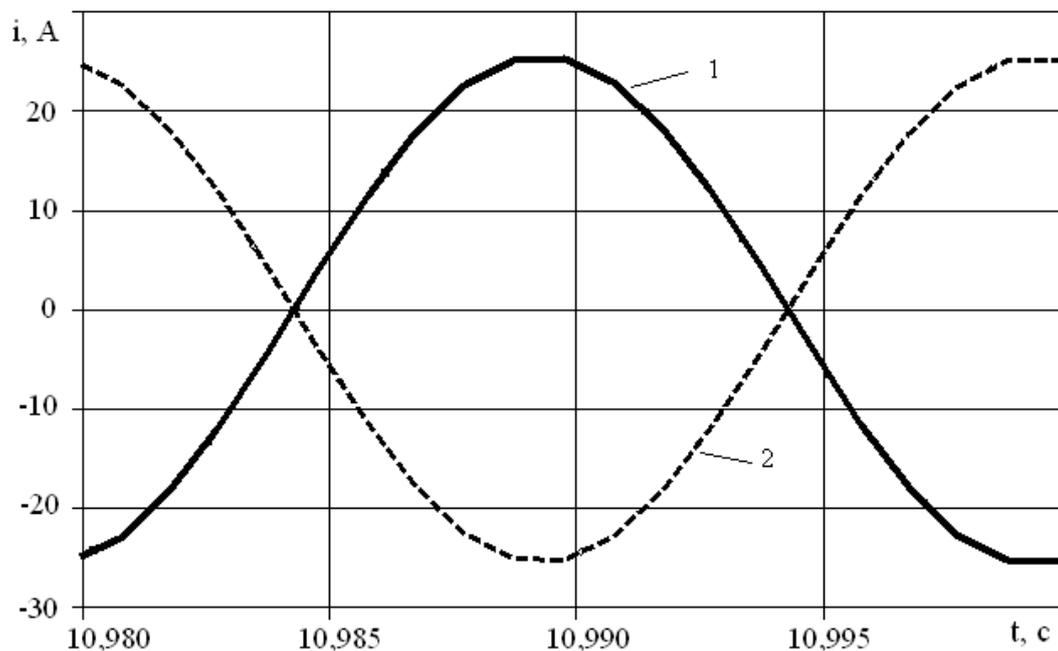
*Тестовый режим 1.* При возбуждении обмотки, расположенной на одном из стержней, в невозбужденных разомкнутых обмотках других стержней будет наводиться существенная ЭДС (немного меньше половины приложенного напряжения, в соответствии с параметрами трансформатора). Например, при возбуждении одной из фаз первичной обмотки тест проводится при разомкнутых двух других фазах первичной обмотки и всех разомкнутых фазах вторичной обмотки.

*Тестовый режим 2.* Аналогичен предыдущему, но при замкнутых обмотках других стержней (при котором в замкнутых обмотках невозбужденных стержней возникают существенные токи). В компьютерной модели замораживаем невозбужденные фазы первичной обмотки на землю. Фазы вторичной обмотки могут быть все разомкнуты либо вторичная обмотка нагружена на номинальную нагрузку.

На рис. 1–3 показаны результаты тестирования компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым трёхстержневым магнитопроводом. Во всех случаях возбуждена фаза А первичной обмотки – к ней приложено синусоидальное напряжение амплитудой 100 В. Нелинейность кривой намагничивания не учитывается. Уравнения модели соответствуют схеме и группе соединения Y/Y–0. На рис. 1 показаны результаты тестового режима 1 – ЭДС в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки. На рис. 2 приведены результаты тестового режима 2 – токи в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки при разомкнутых фазах вторичной обмотки.

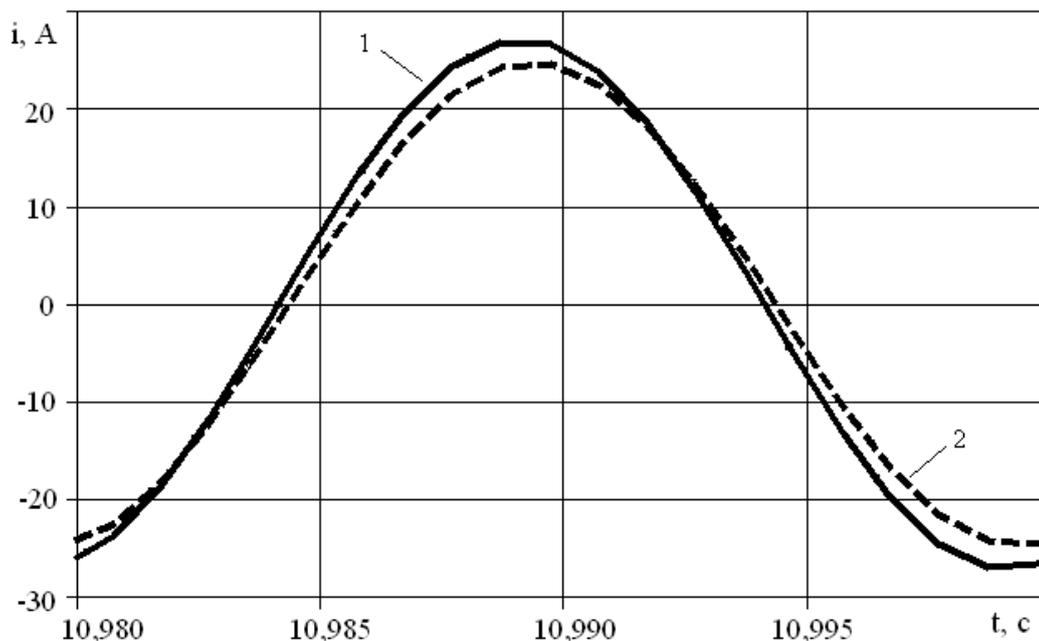


**Рис. 1.** Результаты тестирования компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым трёхстержневым магнитопроводом. Тестовый режим 1 – ЭДС в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки: 1 –  $e_{a1}$ ; 2 –  $e_{b1}$ ; 3 –  $(-e_{c1})$



**Рис. 2.** Результаты тестирования компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым трёхстержневым магнитопроводом. Тестовый режим 2 – токи в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки: 1 –  $i_{a1}$ ; 2 –  $(-i_{b1})$  и  $(-i_{c1})$ . Фазы вторичной обмотки разомкнуты

На рис. 3 даны результаты тестового режима 2 – токи в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки при номинальной нагрузке, подключённой ко вторичной обмотке.



**Рис. 3.** Результаты тестирования компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым трёхстержневым магнитопроводом. Тестовый режим 2 – токи в возбуждённой и невозбуждённых фазах первичной обмотки при номинальной нагрузке, подключённой ко вторичной обмотке: 1 –  $i_{a1}$ ; 2 –  $i_{b1}$  и  $i_{c1}$

Из анализа графиков на рис. 1–3 можно сделать вывод, что тестируемая компьютерная модель отвечает критериям работоспособности, сформулированным в [12]: на рис. 1  $E_{b1} = E_{c1} = 0,499E_{a1}$ ; на рис. 2  $I_{b1} = I_{c1} = 0,995I_{a1}$ ; на рис. 3  $I_{b1} = I_{c1} = 0,913I_{a1}$ .

В [13] приведён пример использования компьютерной модели для моделирования процессов в трансформаторе со схемой соединения Ш/У при питании от полумостового автономного инвертора напряжения.

Так как в современных электроприводе и электроэнергетике получили распространение схемы с импульсными системами выпрямителей [14, 15], а также с преобразователями частоты на основе многоуровневых автономных инверторов [16–20], то востребованными являются математические и компьютерные модели трёхфазных трёхобмоточных трансформаторов, а также трансформаторов с обмотками, соединёнными по схеме «зигзаг». Такие модели могут быть получены на основе опубликованных в [1, 2] уравнений и схем.

Известны компьютерные модели трёхфазного трёхобмоточного трансформатора и трёхфазного трансформатора с соединением первичной обмотки по схеме «зигзаг» в MATLAB Simulink [21]. Недостатком является то, что модели построены на основе трёх однофазных трёхобмоточных трансформаторов, что не отражает наличия сильной магнитной связи между фазами в трансформаторе, выполненном на едином магнитопроводе. Компьютерному моделированию процессов в трёхфазных трансформаторах со схемой соединения обмоток «зигзаг» с единым магнитопроводом посвящена работа [22], но из публикации, как и из [12], не ясен способ компьютерной реализации математической модели.

Из [3] следует, что каждая фаза схемы соединения обмоток «равноплечий зигзаг» формируется из двух одинаковых полуобмоток, соединённых последовательно. Причём сдвиг ЭДС в полуобмотках составляет  $60^\circ$  эл. Например, в трансформаторе со схемой и группой состояния D/Z – 0 можно констатировать, что ЭДС одной из полуобмоток составляет с ЭДС первичной обмотки группу 1 (отставание на  $30^\circ$  эл.), а другая полуобмотка – группу 11 опережение на  $30^\circ$  эл.).

В первую очередь получим компьютерную модель трёхфазного трёхобмоточного трансформатора D/Y/Y – 1 – 11, где имеются две одинаковые вторичные обмотки. За основу возьмём параметры двухобмоточного трансформатора [2], по отношению к вторичной обмотке

которого каждая из вторичных обмоток трёхобмоточного (вторичная и третичная) будет представлять половину. Основные элементы компьютерной модели показаны на рис. 4–6. Параметры модели трансформатора указаны на рис. 7 слева. Получив приемлемые результаты моделирования трансформатора D/Y/Y – 1 – 11, можно приступить к составлению модели D/Z – 0. Для этого следует вывести иерархического блока, символизирующего трёхобмоточный трансформатор, соединить таким образом, как показано на рис. 7: начала фаз третичной обмотки, концы которой соединены в одну точку, присоединить к концам одноимённых фаз вторичной обмотки. Начала фаз последней соединяются с нагрузкой. Содержимое иерархического блока для модели D/Z – 0 остаётся тем же, что показано на рис. 4–6 для случая D/Y/Y – 1 – 11.

При соединении вторичной обмотки по схеме «зигзаг» модель даёт величину напряжения на вторичной обмотке в 1,15 раза меньше, чем при соединении вторичной обмотки по схеме «звезда», что верно (см. [23]).

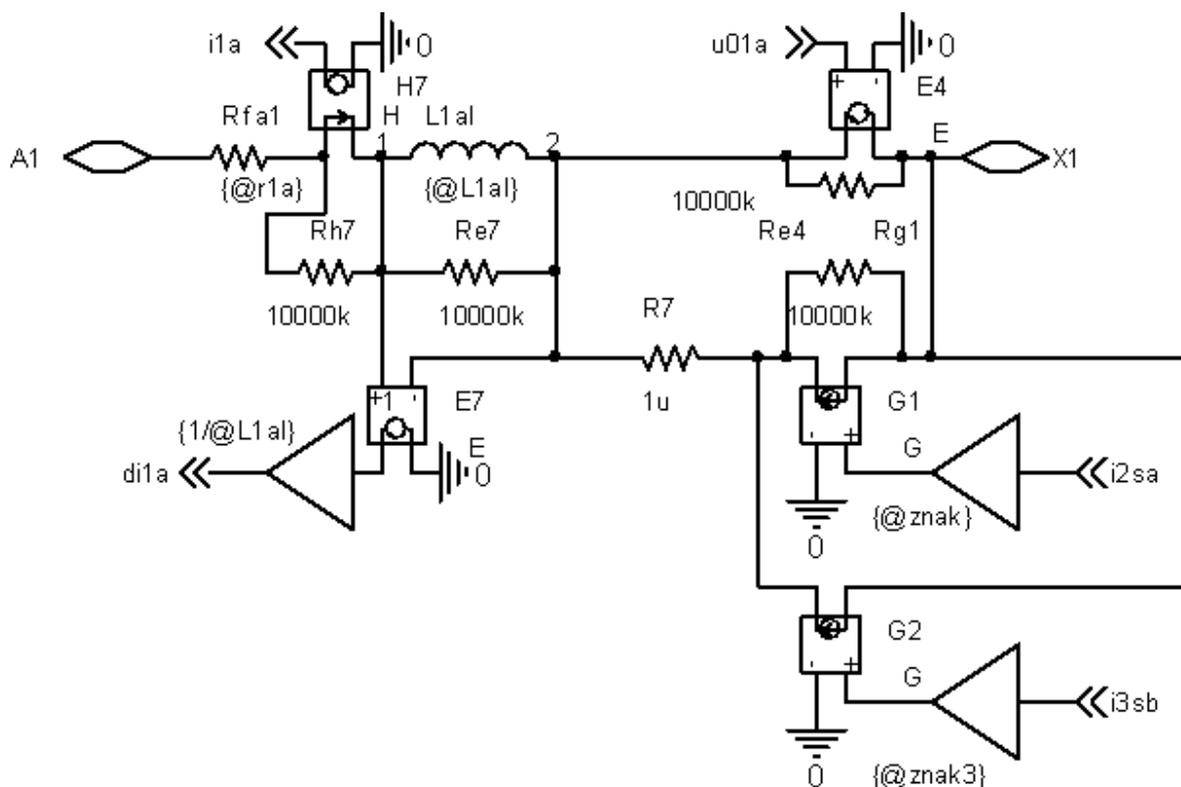


Рис. 4. Графическое изображение компьютерной модели фазы А первичной обмотки трансформатора D/Y/Y – 1 – 11

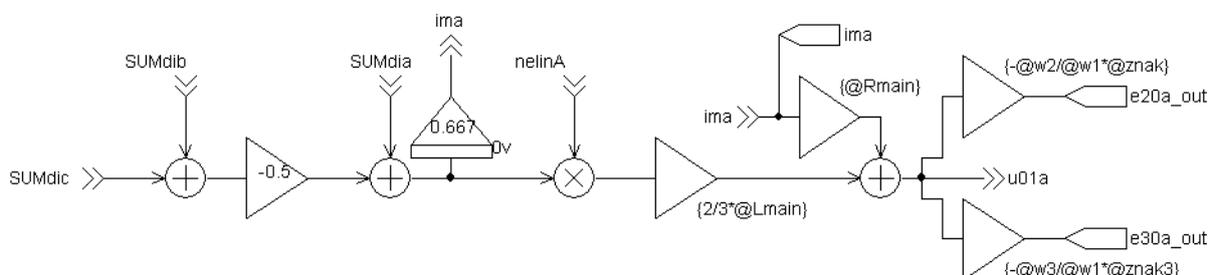


Рис. 5. Графическое изображение компьютерной модели ветви намагничивания фазы А трансформатора D/Y/Y – 1 – 11

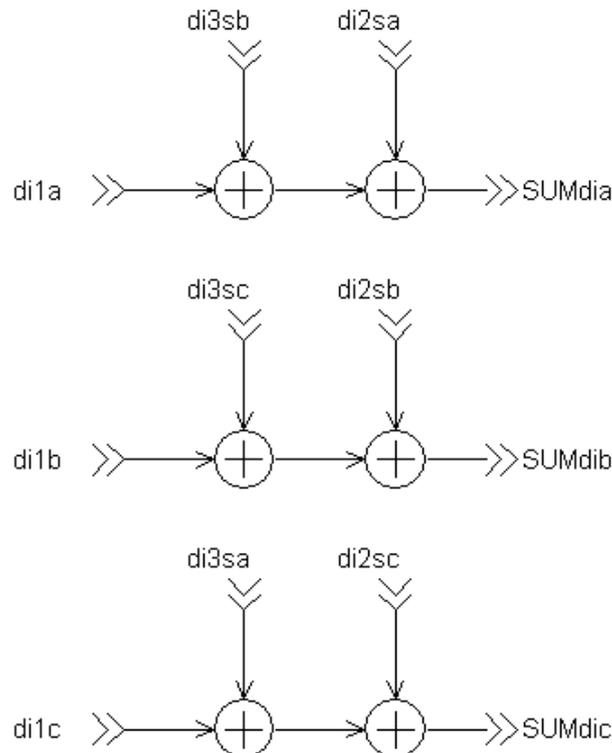


Рис. 6. Суммы производных токов фаз трансформатора D/Y/Y – 1 – 11

На рис. 8 представлены результаты моделирования напряжений в режиме холостого хода трансформатора D/Z – 0.

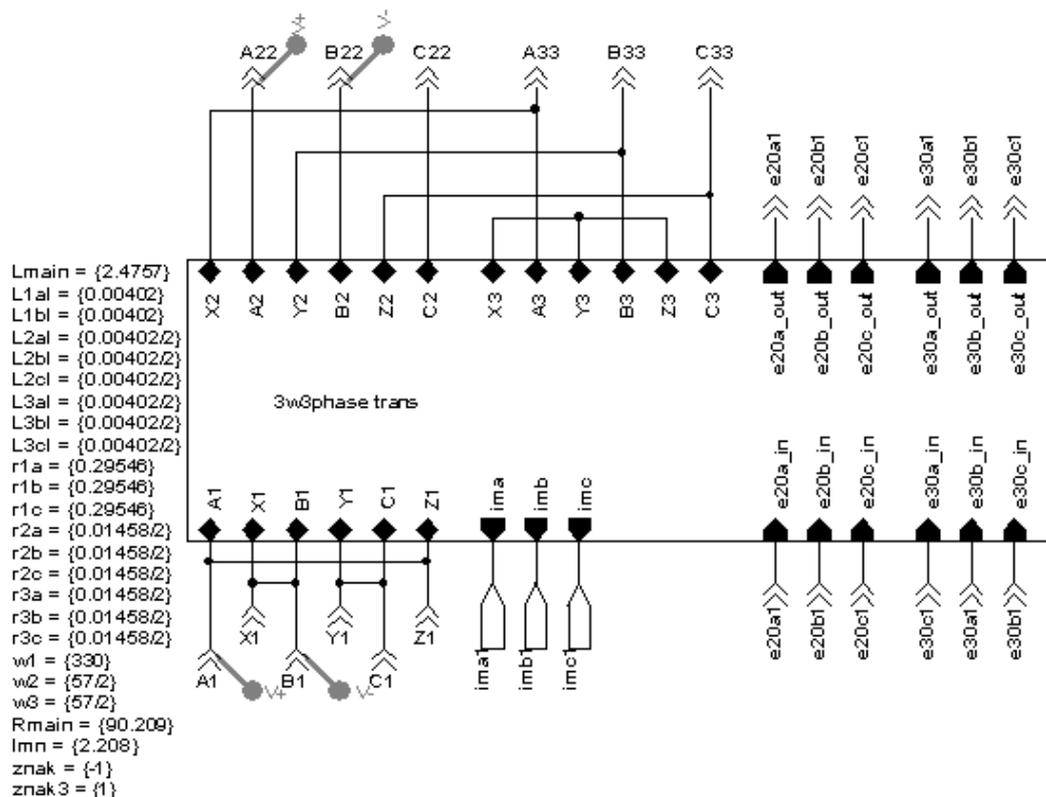
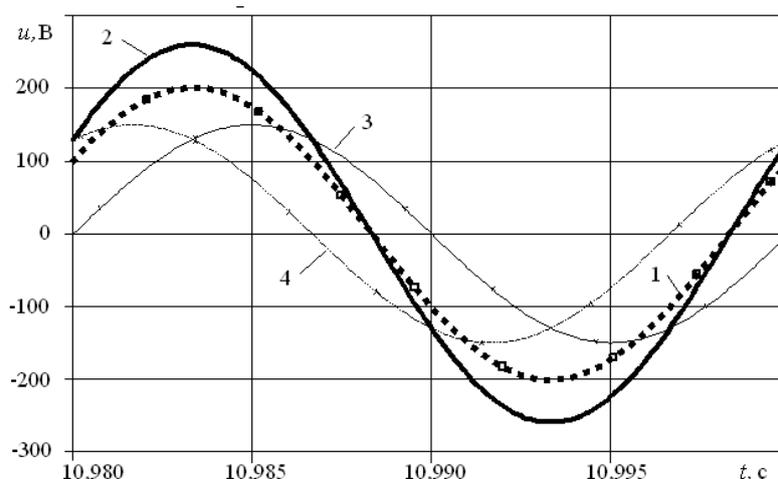


Рис. 7. Иерархический блок, символизирующий модель трансформатора D/Z – 0 (получена за счёт последовательного соединения фаз вторичной и третичной обмоток модели D/Y/Y – 1 – 11)



**Рис. 8.** Результаты моделирования режима холостого хода трансформатора  $D/Z = 0$ . Кривые: 1 – напряжение фаза-ноль первичной обмотки (уменьшено в 5 раз); 2 – фазное напряжение вторичной обмотки; 3 и 4 – соответственно фазные напряжения полуобмоток с отставанием и опережением на  $30^\circ$  эл.

### Выводы

1. Доказано, что ранее разработанная компьютерная модель двухобмоточного трёхфазного трансформатора с единым магнитопроводом по результатам проведённых тестирований отвечает критериям работоспособности.
2. На основе математической и компьютерной моделей трёхфазного двухобмоточного трансформатора с единым магнитопроводом, позволяющей получать все стандартные группы соединений при схемах обмоток «звезда» и «треугольник», разработана компьютерная модель трёхфазного трёхобмоточного трансформатора, а также трансформатора с обмоткой «зигзаг».
3. Модель пригодна для получения нестандартных групп соединения при схеме «неравноплечий зигзаг».
4. В модели возможен учёт безгистерезисной нелинейности кривой намагничивания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трёхфазного трансформатора // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 97–100.
2. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями / М.Ю. Пустоветов, К.П. Солтус, И.В. Синявский. – Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 209 с. – URL: [http://rgups.ru/books/komputernoe\\_modelirovanie\\_asinhronnyh\\_dvigateli\\_i\\_transformatorov.pdf](http://rgups.ru/books/komputernoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigateli_i_transformatorov.pdf) (дата обращения: 06.07.2014)
3. ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93). Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 20 с.
4. Кеун Дж. Электронное моделирование в OrCAD (+DVD). – М.: ДМК Пресс, 2010 – 628 с.
5. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. ORCAD 9.x. ORCAD 10.x. Практика моделирования. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008 – 208 с.
6. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2005 – 200 с.
7. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. – М.: СОЛОН-Р, 2001 – 528 с.
8. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980 – 112 с.

9. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // *Электротехника*. – 2005. – № 5. – С. 57–62.
10. Пустоветов М.Ю., Пехотский И.В. Способ учёта нелинейности кривой намагничивания при переменной частоте питающего напряжения // *Вестник ВЭЛНИИ*, 2004, – № 1. – С. 239–249.
11. Пустоветов М.Ю. Тестирование работоспособности компьютерной модели трёхстержневого трансформатора/ *Технологія-2014 : матеріали міжнар.наук.-техн. конф.* – Северодонецк. 4–5 квіт. 2014. – Северодонецк: Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2013. – Ч. II. Укл. Тарасов В.Ю. – С. 75–78. – URL: [http://www.sti.lg.ua/files/nauka/conf/tech2014/tez\\_part\\_2.pdf](http://www.sti.lg.ua/files/nauka/conf/tech2014/tez_part_2.pdf) (дата обращения: 10.07.2014).
12. Бошняга В.А., Суслов В.М. Моделирование трёхфазных трансформаторных устройств с трёхстержневым магнитопроводом для инженерных расчётов несимметричных режимов при различных схемах соединения обмоток // *Проблемы региональной энергетики*, 2013. – № 2 (22) – С. 38–50.
13. Пустоветов М.Ю., Синявский И.В. Устройство для питания трёхфазных и однофазных вспомогательных цепей электровоза постоянного тока и способы управления этим устройством // *Труды Международной научно-технической конференции «Электроэнергетическая инфраструктура и электроподвижной состав железнодорожного транспорта. Современные проблемы и задачи»*, 21–22 мая 2013 г. – Ростов н/Д: РГУПС, 2013. – С. 58–62.
14. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
15. Бурков А.Т. *Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп.* – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
16. Хакимьянов М.И., Шабанов В.А. Входные многообмоточные трансформаторы для многоуровневых преобразователей частоты // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, 2012, № 5. – С. 47–54. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Nakimyanov/Nakimyanov\\_8.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Nakimyanov/Nakimyanov_8.pdf) (дата обращения: 10.03.2014).
17. Bin Woo. *High-Power Converters and AC Drives*. – New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2006. – 352 p.
18. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай, И.Г. Титаренко // *Электротехника и электромеханика*, 2013. – № 2. – С. 40–47.
19. Моделирование мощного частотно-регулируемого электропривода, выполненного на основе многопульсного инвертора тока / Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, И.Г. Титаренко и др. // *Электротехника и электромеханика*, 2013. – № 5. – С. 50–55.
20. Сопоставление преобразовательных систем высоковольтного частотно-регулируемого электропривода переменного тока / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.С. Крылов и др. // *Электротехника и электромеханика*, 2013. – № 6. – С. 49–58.
21. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 288 с. (Серия «Проектирование»).
22. Бошняга В.А., Суслов В.М. Исследование несимметричных режимов трёхфазных трёхстержневых трансформаторов со схемой соединения обмоток «в зигзаг» // *Проблемы региональной энергетики*, 2013. – № 3 (23). – С. 39–46.
23. Вольдек А.И. *Электрические машины: учебник для студ. высш. техн. учебн. заведений.* – 2-е изд, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

Поступила 06.10.2014.