

АНАЛИЗ ИЗОБРЕТЕНИЙ В ОБЛАСТИ ВХОДНЫХ МНОГООБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ

ANALYSIS OF THE INVENTIONS INPUT MULTIWINDING TRANSFORMERS FOR MULTI-LEVEL INVERTERS

Авторы приводят сравнение достоинств и недостатков многообмоточных входных трансформаторов с различными типами магнитопроводов. Рассматриваются отечественные и зарубежные патенты ведущих фирм. Выполнен анализ патентов входных многообмоточных трансформаторов для высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты. Сделаны выводы о перспективных конструкциях с точки зрения технологичности изготовления, симметрии магнитных потоков и энергетических характеристик.

The authors compare the advantages and disadvantages multiwinding input transformers with different types of cores. The russian and foreign patents of leading firms are considered. Analysis of multiwinding input transformer patents for high voltage multilevel inverters are given. Conclusions about promising designs from the standpoint of ease of manufacture, the symmetry of the magnetic flux and energy characteristics are made.

М.И. Хакимьянов, В.А. Шабанов
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный авиационный
технический университет

M.I. Hakimyanov, V.A. Shabanov
FSBEI Ufa state aviation technical
university

Ключевые слова: входные трансформаторы, преобразователи частоты, частотно-регулируемый электропривод, магнитопровод.

Keywords: Input transformers, inverters, variable speed drive, magnetic core.

В настоящее время развитие промышленного электропривода движется по пути повышения энергоэффективности и внедрения технологий энергосбережения, что обусловлено систематическим ростом цен на энергоносители и кризисной экономической ситуацией. Один из основных источников энергосбережения – это внедрение высоковольтного частотно-регулируемого электропривода. Оптимизация режимов работы мощных электроприводов позволяет получить значительную экономию электроэнергии в таких отраслях как трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов, нефтехимия и нефтепереработка, металлургия, жилищно-коммунальное хозяйство, нефтегазодобыча [1].

Однако сами высоковольтные преобразователи частоты (ПЧ) являются очень сложными и дорогостоящими изделиями. И если раньше высоковольтные ПЧ строились, главным образом, по двухтрансформаторной схеме, то, начиная с середины 90-х годов, наметился переход к использованию многоуровневых преобразователей частоты (МУПЧ) [2]. Это объясняется такими их достоинствами, как синусоидальная форма выходного напряжения, низкий уровень гармоник, вносимых в сеть и в обмотки электродвигателя, возможность работы в области низких частот, сохранение работоспособности ПЧ в целом при повреждении отдельных силовых ячеек.

Наиболее сложным, ответственным и дорогостоящим узлом МУПЧ является входной трансформатор, называемый многофазным или

многообмоточным. Благодаря специальным схемам соединения вторичных обмоток «звезда», «треугольник» и «зигзаг» трехфазное входное напряжение преобразуется в многофазное выходное с небольшим угловым сдвигом [3].

Сам принцип получения напряжений со сдвигом фаз иллюстрируют схемы из патента США № 6340851 «Модульное устройство трансформатора для использования с МУПЧ» фирмы «Electric Boat Corporation», приведенные на рисунке 1. На рисунке 1, а показано соединение вторичных обмоток по схеме «треугольник-зигзаг», а на рисунке 1, б – по схеме «звезда-зигзаг». Обмотки трансформатора, как видно из рисунка 2, размещаются на магнитопроводе из трех параллельных стержней.

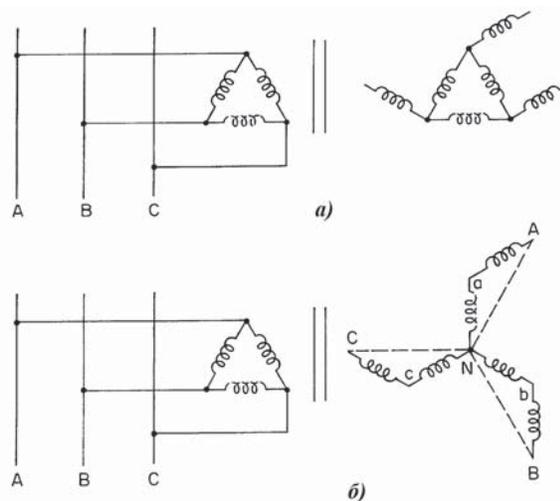


Рисунок 1. Получение напряжений со сдвигом фаз, патент США № 6340851: а) соединение вторичных обмоток «треугольник-зигзаг»; б) соединение вторичных обмоток «звезда-зигзаг»

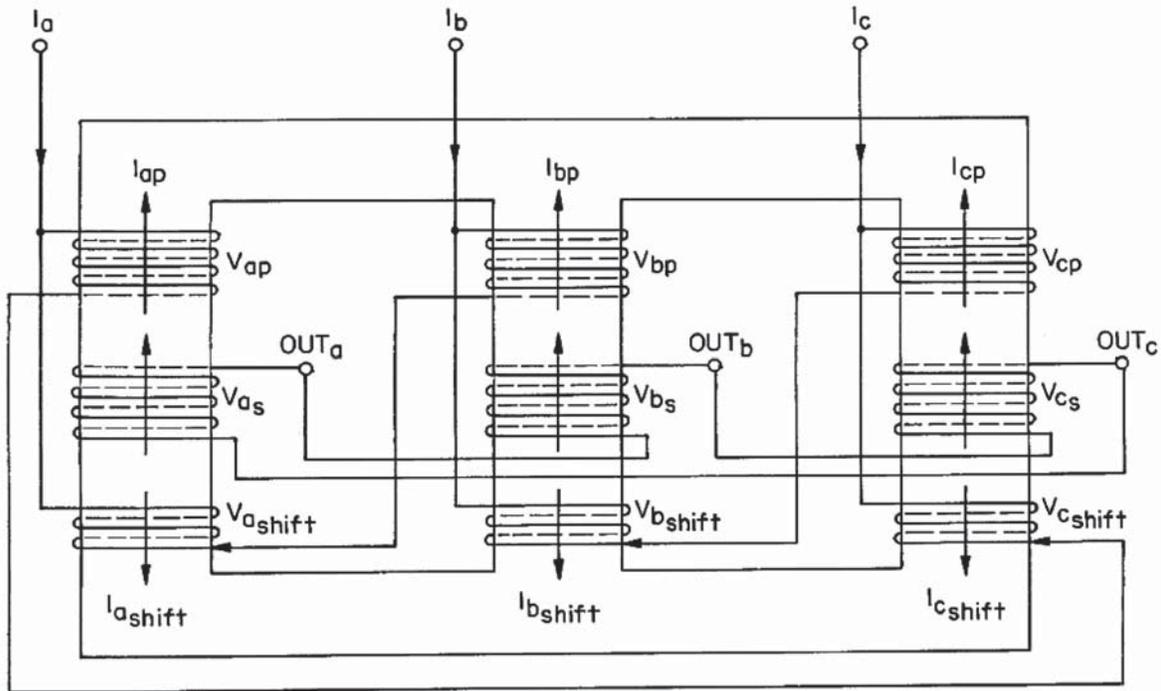
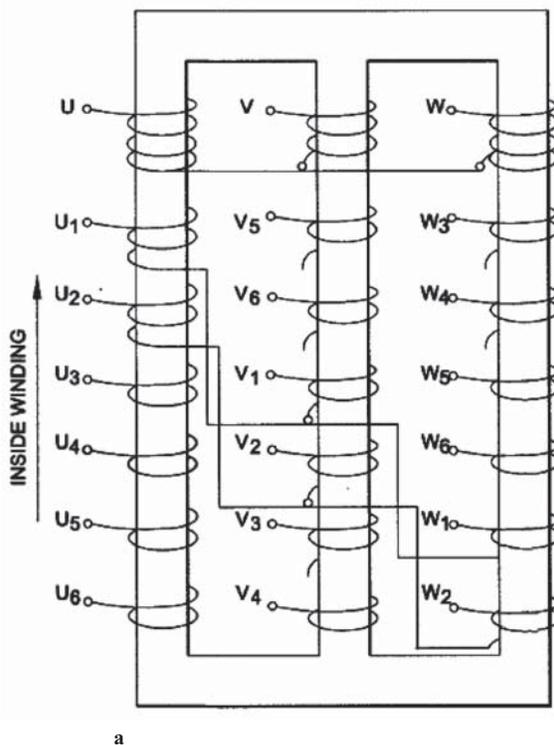


Рисунок 2. Модульный трансформатор для МУПЧ, пат. США № 6340851

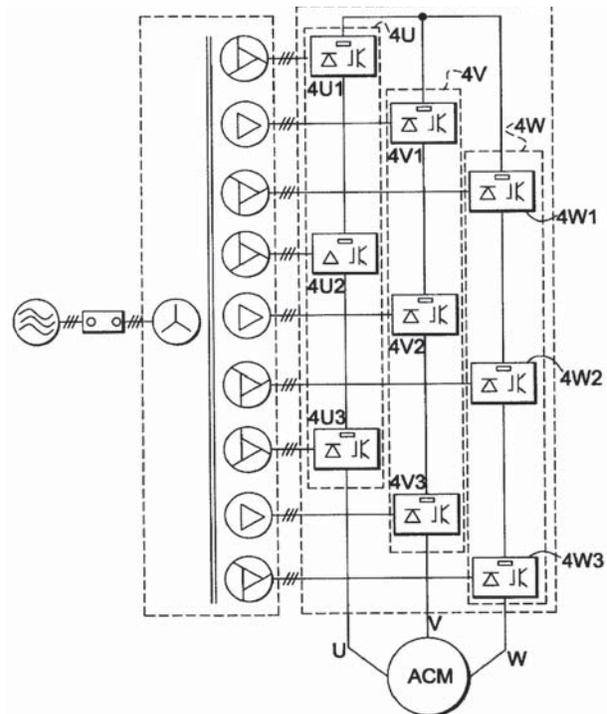
Многообмоточный трансформатор аналогичной конструкции предложен фирмой «Toshiba» в патенте США № 6229722 «Многоинверторная система». Система включает в себя входной многообмоточный трансформатор (рисунок 3, а), к вторичным обмоткам которого подключены соединенные последовательно силовые ячейки инвертора (рисунок 3, б).

Магнитопровод выполнен плоским из трех параллельных стержней. Трансформатор имеет одну первичную трехфазную обмотку, соединенную в звезду, и 9 (или более) вторичных трехфазных обмоток.

Такой тип входных трансформаторов широко используется в МУПЧ различных производителей и



а



б)

Рисунок 3. Многоинверторная система фирмы Toshiba, пат. США № 6229722: а) входной трансформатор; б) структурная схема МУПЧ

используется в патентах на многоуровневые инверторы у целого ряда фирм. Достоинством трансформаторов с плоским магнитопроводом из трех параллельных стержней является простота конструкции. Однако им присущ недостаток в виде неравенства магнитных потоков среднего стержня и двух крайних стержней.

Избавиться от этого недостатка можно, если выполнить магнитопровод не из трех, а из четырех параллельных стержней (рисунок 4, а), как это предложено в патенте РФ № 2396625 специалистами из Казанского государственного энергетического университета.

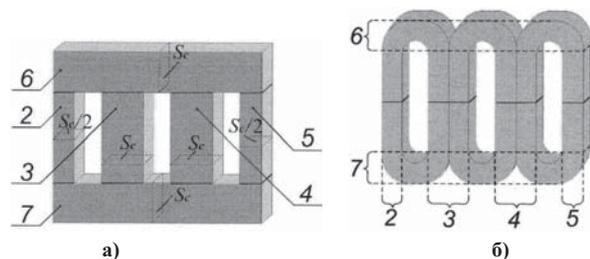


Рисунок 4. Магнитопровод четырехстержневого трансформатора, пат. РФ № 2396625:

а) плоский магнитопровод; б) магнитопровод в виде набора О-образных колец

Трансформатор выполнен из четырех параллельных стержней 2, 3, 4, 5 одинаковой длины и ярм 6, 7, причем площадь сечения крайних стержней трансформатора 2 и 5 вдвое меньше площади внутренних стержней 3 и 4. Каждый стержень охвачен одинаковыми первичными обмотками и группой вторичных обмоток. Обмотки, охватывающие один крайний стержень, включены последовательно и согласно с обмотками, охватывающими другой крайний стержень. Такое техническое решение позволило обеспечить фазную симметрию трансформатора, сохранив плоскую конструкцию магнитопровода. Плоский магнитопровод может быть выполнен в виде набора О-образных колец (рисунок 4, б), что обеспечивает технологичность изготовления трансформатора. Эта конструкция эквивалентна конструкции, изображенной на рисунке 4, а, и ее можно условно разделить на стержни 2, 3, 4, 5 и ярма 6 и 8.

Другой путь добиться симметрии фаз – сделать конструкцию многообмоточного трансформатора по аналогии с трехфазным электродвигателем. Первичная трехфазная обмотка располагается на магнитопроводе статора, а вторичные обмотки – на заторможенном роторе.

Один из первых трансформаторов на основе использования вращающегося магнитного поля был предложен в патенте США № 5317299 «Электромагнитный трансформатор» в 1994 году фирмой «Sundstrand Corporation». Трансформатор имеет первичную и вторичную обмотки, размещен-

ные соответственно на внешнем и внутреннем сердечниках для создания вращающегося электромагнитного поля (рисунок 5). При подаче на первичную обмотку трехфазного напряжения образуется вращающееся магнитное поле, которое создает во вторичной обмотке трехфазное напряжение. Первичная и вторичная обмотки соединяются в звезду или в треугольник.

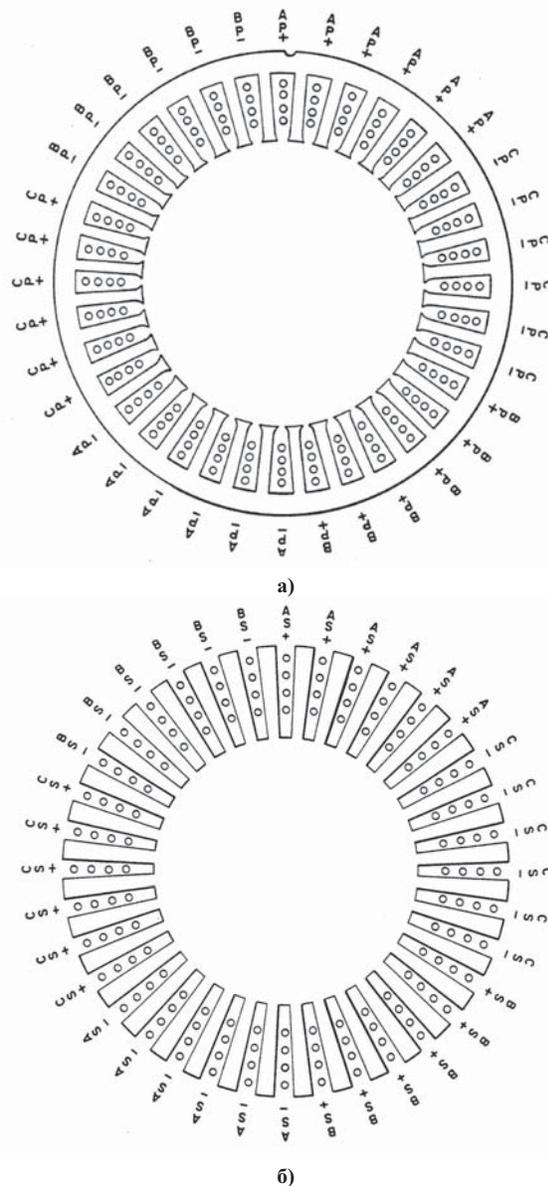


Рисунок 5. Многообмоточный трансформатор на основе использования вращающегося магнитного, пат. США № 5317299:

а) расположение первичной обмотки на внешнем сердечнике; б) расположение вторичных обмоток на внутреннем сердечнике

Фирмой Siemens (патент США № 7948340 «Трехфазный многообмоточный трансформатор») в 2008 году запатентован трансформатор, сердечник которого аналогичен по конструкции статору асинхронного электродвигателя. Магнитопровод такого

трансформатора состоит из внутреннего и внешнего сердечников, которые жестко закреплены относительно друг друга (рисунок 6). Сердечники имеют множество пазов. Трансформатор содержит первичную обмотку на внешнем сердечнике вторичные обмотки на центральном сердечнике. Первичные обмотки создают вращающееся магнитное поле. Это поле является симметричным по отношению к любой из вторичных обмоток. В этом главное преимущество трансформаторов на основе магнитопроводов, аналогичных конструкции статора трехфазных электродвигателей.

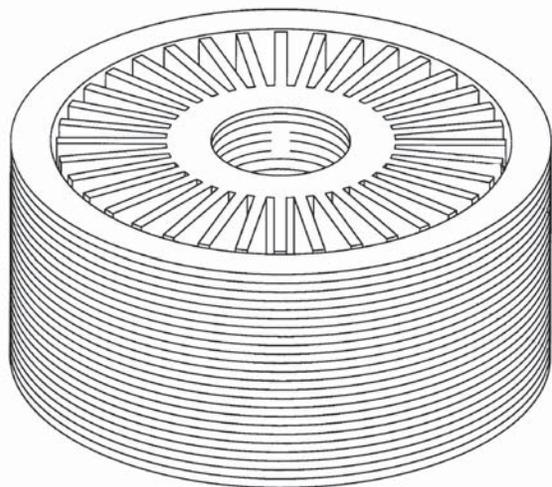


Рисунок 6. Трехфазный многообмоточный трансформатор

Фирмой Robicon запатентован автотрансформатор для преобразования трехфазного переменного тока в девятифазный (пат. США № 5619407, 1997 год). Автотрансформатор состоит из трех обмоток, каждая из которых содержит последовательно включенные катушки (рисунок 7).

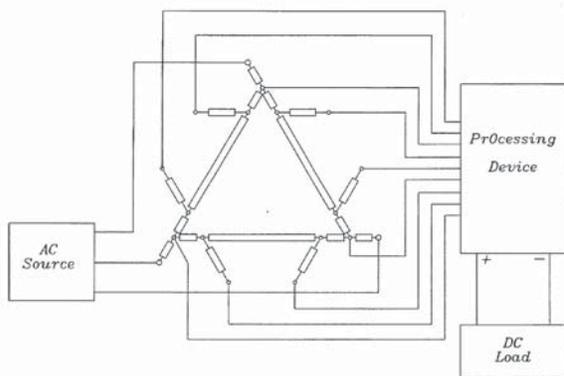


Рисунок 7. Автотрансформатор фирмы Robicon

Еще один способ добиться фазной симметрии – это выполнить магнитопровод из трех радиально расположенных под углом 120° стержней. В патенте РФ № 2081467 «Пространственный магнитопровод»

предлагается радиальная конструкция магнитопровода, содержащего стержни и ярма, соединенные в звезду (рисунок 8). Лента из электротехнической стали намотана в виде одного рулона поперечного продольной оси 2 магнитопровода. В ленте выполнены окна 3. Магнитопровод состоит из стержней 6, 7 и 8, и внешних ярм 9, 10. Ширина окон 3 в каждом слое намотки в его опрессованном состоянии согласно осей симметрии 11, 12 и 13, проходящих через середины сечений стержней 6, 7 и 8 к вертикальной его оси, равна ширине окон магнитопровода, необходимой для размещения в них обмоток 1, насаживаемых на стержни при выполнении трансформатора.

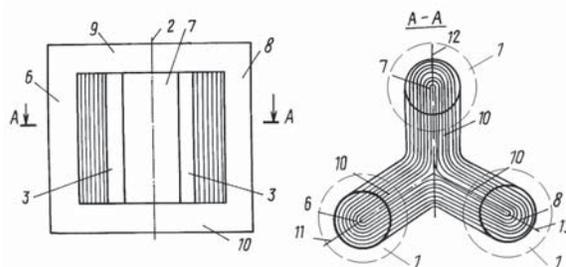


Рисунок 8. Пространственный магнитопровод в виде звезды

В патенте РФ № 2398300 «Магнитопровод индукционного устройства и способ его изготовления» предложен магнитопровод, в котором сердечник содержит три радиально расположенных стержня, охваченных ярмом в виде кольца (рисунок 9). При таком конструктивном выполнении магнитопровода обеспечивается полная симметрия фаз, что позволяет существенно повысить технические характеристики.

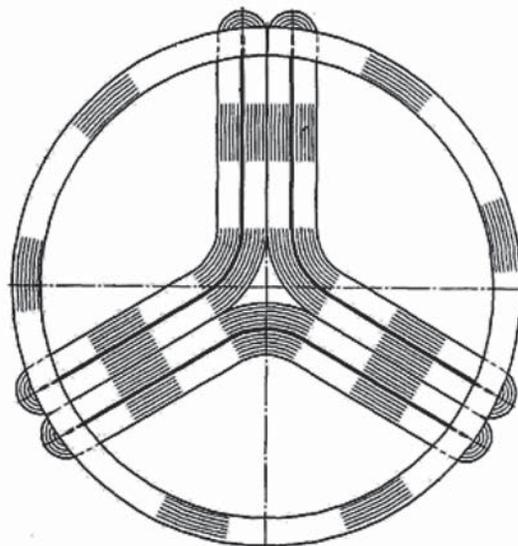


Рисунок 9. Магнитопровод с радиальным расположением стержней и кольцевым ярмом

Специалистами Кубанского государственного аграрного университета, Кубанского государственного технологического университета и ООО «Электроспектр» предложены многофазные трансформаторы с магнитопроводом тороидальной конструкции. В патенте РФ № 2082245 «Многофазный трансформатор» (рисунок 10) трансформатор выполнен в виде тороидального витого среднего и двух тороидальных витых боковых магнитопроводов. На торцах среднего магнитопровода выполнены пазы, в которые уложена первичная трехфазная обмотка, охватывающая этот магнитопровод. К среднему магнитопроводу через немагнитные прокладки примыкают два боковых магнитопровода. На торцах боковых магнитопроводов выполнены пазы, в которые уложены две вторичные многофазные обмотки. По сравнению с трансформатором с вращающимся магнитным полем, у которого магнитопровод выполнен по типу трехфазного электродвигателя, упрощается конструкция и технология изготовления трансформатора. По сравнению с трех стержневыми трансформаторами плоской конструкции обеспечивается симметрия магнитной цепи.

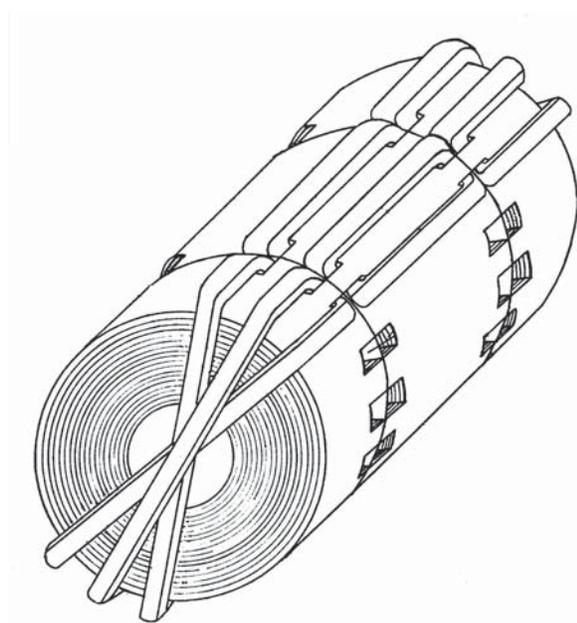


Рисунок 10. Многофазный трансформатор с тороидальными магнитопроводами

В патенте РФ № 2115186 трехфазная первичная и многофазная вторичная обмотки размещены в одних и тех же пазах среднего тороидального витого магнитопровода с охватом этого магнитопровода, к торцам которого через немагнитные прокладки примыкают два витых боковых магнитопровода без пазов (рисунок 11). Это позволяет упростить конструкцию и технологию изготовления трансформатора и повысить симметрию магнитной цепи.

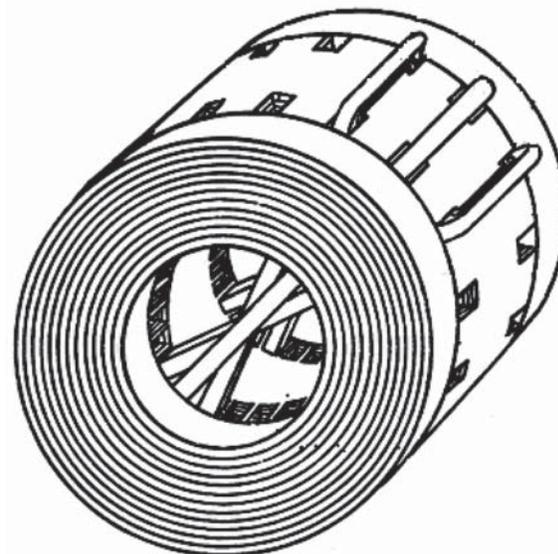


Рисунок 11. Многофазный трансформатор с тороидальными магнитопроводами

В патенте РФ № 2125312 предложено первичную трехфазную обмотку выполнять с укороченным шагом. В патентах РФ №№ 2187163, 2218626 и 2246151 предложены конструкции многофазного трансформатора с зубцами, наклеенными на торцевые поверхности магнитопровода. При этом два боковых кольцевых магнитопровода, примыкающих к торцевым поверхностям среднего магнитопровода в конструкции магнитопровода по рисунку 10, выполнены без пазов, а трехфазная первичная и многофазная вторичная обмотки уложены в пазы между витыми зубцами, наклеенными на торцевые поверхности среднего магнитопровода (рисунок 12). Трансформатор содержит средний витой кольцевой магнитопровод 1, на обе торцевые поверхности которого при помощи ферромагнитного клея наклеены витые зубцы 2. В пазы, образованные витыми зубцами 2 и торцевыми поверхностями среднего витого кольцевого магнитопровода, уложены секции трехфазной первичной и многофазной вторичной обмоток 3. С двух противоположных сторон к среднему витому кольцевому магнитопроводу, с наклеенными на него зубцами, примыкают два боковых витых кольцевых магнитопровода 4.

Такая конструкция снижает потери на вихревые токи.

В патенте РФ № 2218626 предлагается наклеивать зубцы так, чтобы образовались пазы V-образной формы, причем зубцы приклеиваются ферромагнитным клеем. В патенте РФ № 2246151 зубцы прямоугольной формы, наклеены на внешние торцевые поверхности колец среднего магнитопровода и приварены к ним по внешней и внутренней образующим.

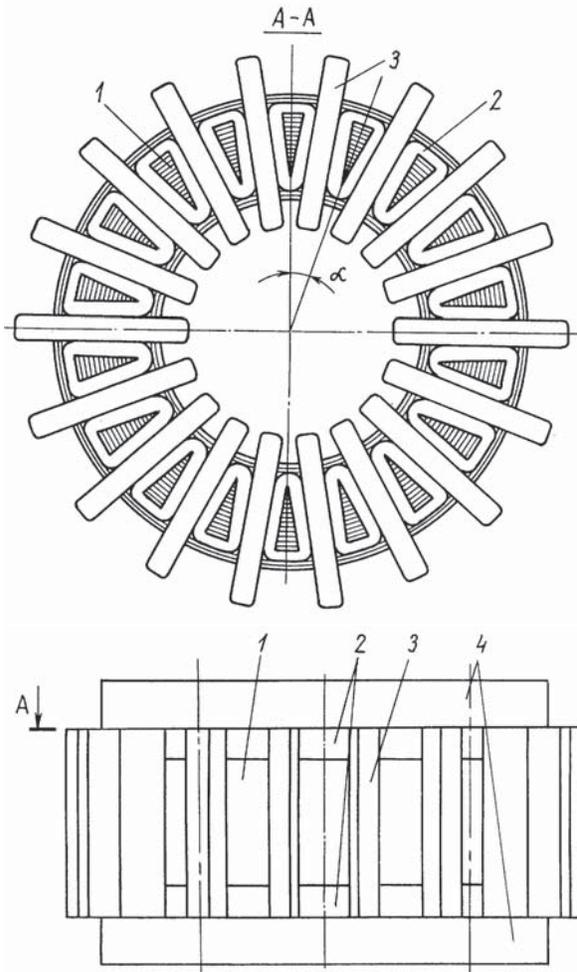


Рисунок 12. Многофазный трансформатор

Недостатком трансформаторов с тороидальными магнитопроводами является сложность их изготовления на большие мощности.

Особенностью нефтегазовой отрасли является широкое использование высоковольтных электродвигателей большой мощности. Так в трубопроводном транспорте нефти используются

электродвигатели мощностью до 8 МВт, а в трубопроводном транспорте газа – 12,5 МВт [4, 5]. При таких мощностях основными требованиями к входным трансформаторам МУПЧ являются, наряду с симметрией магнитной системы, технологичность изготовления, надежность и высокий КПД. Из всех известных и рассмотренных в настоящем обзоре многофазных трансформаторов таким требованиям в наибольшей степени удовлетворяют трансформаторы с вращающимся магнитным полем на основе магнитопроводов трехфазных электродвигателей.

Выводы.

1. Разработка новых конструкций входных многообмоточных трансформаторов для многоуровневых инверторов является актуальной проблемой. Широко разрабатываются входные трансформаторы как на классическом стержневом магнитопроводе, так и на магнитопроводах оригинальных конструкций (тороидальных), а также на основе магнитопроводов асинхронных двигателей с вращающимся магнитным полем.

2. В настоящее время большинство МУПЧ выполняются с входными трансформаторами на плоском трехстержневом магнитопроводе, технология изготовления которого наиболее освоена трансформаторной промышленностью. Однако такая конструкция не обеспечивает симметрии магнитных потоков.

3. Получить симметричный магнитный поток во всех трех фазах позволяют трансформаторы с радиальным расположением стержней (в форме звезды), а также с магнитопроводами на основе трехфазных двигателей.

4. Для ПЧ большой мощности наиболее перспективными, по мнению авторов, являются многофазные трансформаторы на основе магнитопроводов трехфазных двигателей. В таком трансформаторе вращающееся магнитное поле симметрично по отношению к любой из вторичных обмоток, что является основным достоинством такой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка и организация серийного производства ВЧРП - цель, назначение и основные ожидаемые результаты: проект / Федотов А.Б. и др. // Электропривод, электротехнологии электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. / III Всеросс. науч.-техн. конф. (с междунар. участием); редкол.: В.А. Шабанов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 3-10.

2. Гузеев Б.В., Хакимьянов М.И. Обзор современных высоковольтных преобразователей частоты для асинхронных и синхронных двигателей // Электропривод, электротехнологии электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. / III Всеросс. науч.-техн. конф. (с междунар. участием); редкол.: В.А.

Шабанов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 42-53.

3. Гузеев Б.В., Хакимьянов М.И. Современные промышленные высоковольтные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. №3. С. 441-449. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev_1.pdf.

4. Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи. Альметьевск: АО «Татнефть», 1998. С. 30-34.

5. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности: учебник для вузов; изд.

2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. С. 150-154.

Шабанов В.А., канд.техн.наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ

Shabanov V.A., cand.tech.sci., professor, head of chair «Electrical engineering and electrical equipment», FSBEI USPTU

Хакимьянов М.И., канд.техн.наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ

Hakimyanov M.I.; cand.tech.sci., associate professor of chair «Electrical engineering and electrical equipment», FSBEI USPTU e-mail: joss22@rambler.ru