

УДК 621.31

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ВХОДНЫХ МНОГООБОМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Шабанов В.А., Хакимьянов М.И.¹

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ¹ joss22@rambler.ru

***Аннотация.** В статье выполнен аналитический обзор существующих многообмоточных входных трансформаторов для многоуровневых преобразователей частоты, которые в последние годы все шире начинают применяться на объектах нефтегазовой отрасли. Приводится классификация входных многообмоточных трансформаторов по конструктивному исполнению и по способу получения фазового сдвига. Рассматриваются достоинства и недостатки многообмоточных входных трансформаторов различных типов применительно к частотно-регулируемому электроприводу технологических установок нефтегазовой отрасли.*

***Ключевые слова:** многоуровневые преобразователи частоты, высоковольтный частотно-регулируемый электропривод, многообмоточные входные трансформаторы, нефтегазовая промышленность*

Введение

В последние годы на объектах нефтегазовой отрасли все шире начинают применяться частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП). Разработаны регулируемые электроприводы для погружных электродвигателей нефтедобывающих скважин, для станков качалок, для вентиляторных установок охлаждения газа, для привода основных механизмов буровых установок [1]. Одним из основных недостатков преобразователей частоты (ПЧ) в составе ЧРЭП являются генерация высших гармоник в питающую электрическую сеть и сложность получения близкой к синусоидальной формы выходного напряжения.

Для снижения уровня генерируемых гармоник используются различные способы и средства: установка частотных фильтров (фильтро-компенсирующие устройства, резонансные LC-фильтры, RC-цепи, активные фильтры); замена управляемых выпрямителей в составе ПЧ на неуправляемые; повышение пульсности (числа фаз) выпрямителей. Наиболее перспективным средством снижения уровня высших гармоник является применение многоуровневых ПЧ с многообмоточным трансформатором на входе. Многообмоточные входные трансформаторы (МВТ) в составе высоковольтных ПЧ выполняют две основные функции: повышают пульсность выпрямителей и снижают напряжение до номинальных значений низковольтных IGBT-транзисторов.

Цель статьи – аналитический обзор современных МВТ и выбор наиболее перспективных решений для выполнения ЧРЭП магистральных насосов и других технологических механизмов нефтегазовой отрасли.

Классификация МВТ

Многообмоточные входные трансформаторы различаются своим конструктивным исполнением, принципом действия и способом получения фазового сдвига между напряжениями вторичных обмоток. По конструктивному исполнению магнитопроводов и размещению обмоток все разновидности МВТ для многоуровневых инверторов можно разбить на три группы:

1. МВТ с расположением обмоток на параллельных стержнях многостержневого магнитопровода или стержневые МВТ;
2. МВТ с размещением обмоток на радиально расположенных стержнях магнитопровода или радиальные МВТ;
3. МВТ с тороидальными (цилиндрическими) магнитопроводами.

Принцип действия МВТ определяется способом наведения ЭДС во вторичных обмотках. При этом можно выделить два основных типа МВТ: с трансформаторной ЭДС или трансформаторы с неподвижным магнитным полем, и МВТ с ЭДС вращения, или трансформаторы с вращающимся магнитным полем.

По способу получения фазового сдвига между напряжениями двух смежных вторичных обмоток можно выделить два основных типа МВТ: входные трансформаторы, в которых фазовый сдвиг достигается за счет соответствующего соединения вторичных обмоток разных фаз, и МВТ, в которых фазовый сдвиг достигается пространственным смещением вторичных обмоток.

Аналитический обзор существующих конструкций МВТ

Самой простой конструкцией МВТ, получившей распространение как в качестве силового трансформатора, так и для силовых электронных преобразователей, является трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения типа ТРДН. Такой трансформатор широко применяется в схемах электроснабжения нефтегазовых предприятий [2]. Он содержит две обмотки низшего напряжения. Одна их обмоток соединяется в звезду, а вторая – в треугольник. В результате получается две системы трехфазных вторичных напряжений, сдвинутых по фазе по отношению друг к другу на 30° . Такую систему напряжений называют шестифазной. При трехфазной мостовой схеме выпрямления она позволяет получать 12-ти пульсные выпрямители. Для дальнейшего увеличения пульсности выпрямителей необходимо иметь более двух вторичных напряжений. Для этого можно использовать либо несколько трансформаторов [3, 4], либо на одном магнитопроводе выполнить несколько вторичных обмоток. Конструкция

такого трансформатора с расположением обмоток на параллельных стержнях магнитопровода представлена на рис. 1а [5]. Получение фазового сдвига между напряжениями вторичных обмоток показаны на рис. 1б.

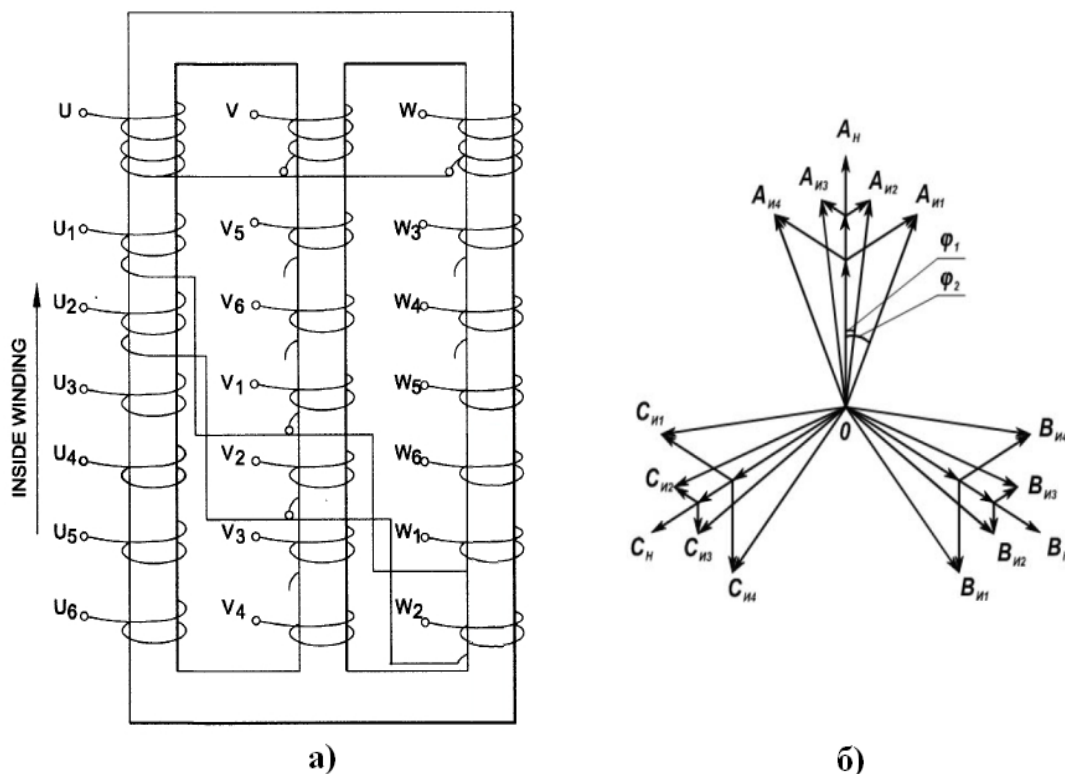


Рис. 1. Трехстержневой многообмоточный трансформатор

В схеме многоуровневого ПЧ к каждой вторичной трехфазной обмотке подключается свой индивидуальный выпрямитель. По постоянному току каждый из выпрямителей подключается к индивидуальному однофазному инвертору. Выходы инверторов одной фазы включаются последовательно. При этом напряжение каждой фазы двигателя равно сумме выходных напряжений последовательно включенных инверторов. Благодаря такой схеме и смещению вторичных напряжений по фазе суммарный коэффициент гармоник ПЧ, даже без специальных мер их подавления и фильтрации, не превышает 3% [6].

Вместе с тем у такой схемы есть и ряд недостатков. Выпрямитель и инвертор образуют низковольтную силовую ячейку. Каждая силовая ячейка современного ПЧ содержит трехфазный мостовой выпрямитель, блок фильтра на выходе выпрямителя, транзисторный однофазный инвертор с блоком управления и блок защитных предохранителей. Обычно низковольтные ячейки многоуровневых транзисторных ПЧ выполняются на напряжение питания 660 В, а в инверторе применяются силовые транзисторы 17 класса (1700 В). При напряжении 6 кВ в одной фазе ПЧ устанавливается до пяти последовательно соединенных ячеек, а при

напряжении 10 кВ – до 9 ячеек (всего соответственно 15 и 27 ячеек). Это значительно увеличивает габариты высоковольтного ПЧ и требует установки сложного МВТ с большим числом вторичных обмоток.

Увеличение числа вторичных обмоток усложняет конструкцию МВТ и повышает его стоимость на столько, что МВТ становится самым дорогостоящим элементом ПЧ. Выполнение многочисленных соединений между вторичными обмотками снижает надежность стержневого трансформатора.

Магнитопровод трехстержневых трансформаторов имеет простую плоскую конструкцию. При этом длина отрезка ярма, соединяющего крайние стержни, больше, чем длина отрезка ярма, соединяющего крайний стержень со средним. Это приводит к неодинаковым значениям индуктивностей обмоток. Компенсировать получившееся отличие индуктивности обмоток, охватывающих стержни, расположенные по краям и посередине магнитопровода, не удастся. Поэтому общим недостатком трехстержневых трансформаторов с параллельным расположением стержней является несимметричность магнитной цепи трансформатора. Несимметричность магнитной цепи не только нарушает равенство напряжений вторичных обмоток, но и ухудшает гармонический состав магнитного потока и вторичных напряжений из-за разной степени насыщения стержней магнитопровода.

Однако, несмотря на отмеченные недостатки, трехстержневые трансформаторы с плоской (стержневой или бронестержневой) конструкцией получили преимущественное распространение. Такие трансформаторы используются в ПЧ компаний Mitsubishi Electric, Trihal, General Electric, Robicon и др. Так например, входной трансформатор ПЧ компании Mitsubishi Electric преобразует трехфазное входное напряжение 6 кВ в 18-фазное выходное напряжение 578 В. Его вторичные обмотки разделены на три группы, в каждой по шесть обмоток. Фазовый сдвиг между соседними обмотками в группе составляет 10° , а между первой и шестой обмотками группы – 50° .

Развитием броневого магнитопровода МВТ является выполнение магнитопровода четырехстержневым [7]. Площадь сечения двух крайних стержней трансформатора вдвое меньше площади двух внутренних стержней. 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. Такая конструкция магнитопровода позволила повысить симметрию магнитной цепи [8]. Но и при такой конструкции исключить полностью недостатки стержневых трансформаторов не удастся.

Таким образом, недостатками МВТ на стержневом магнитопроводе плоской конструкции является несимметрия магнитной цепи, что нарушает равенство напряжений вторичных обмоток и ухудшает гармонический состав магнитного потока, а также сложность выполнения многочисленных соединений между вто-

ричными обмотками разных фаз, что снижает надежность стержневого трансформатора.

Для получения симметричной магнитной цепи необходимо выровнять взаимоиндукцию между всеми стержнями. Для этого достаточно расположить три стержня магнитопровода на равном расстоянии друг от друга, например, в вершинах равностороннего треугольника [9, 10]. Однако, пространственный магнитопровод такого трансформатора имеет низкую прочность и сложную конструкцию. Поэтому трансформаторы с магнитопроводами такого типа не получили широкого распространения.

Другим способом получения симметричного магнитопровода является радиальное расположение стержней под углом 120° , как показано на рис. 2. Магнитопровод из трех радиально расположенных стержней охвачен круговым ярмом [11]. Ярмо намотано из ленты электротехнической стали. Стержни выполнены в виде многовитковых вытянутых по оси петель, намотанных из лент электротехнической стали и спрессованных до сближения смежных плоскостей ленты внутреннего витка.

Такой магнитопровод обладает магнитной симметрией. Недостатками его являются большие материалоемкость и трудоемкость в изготовлении, а также сложность выполнения соединения вторичных обмоток разных фаз для получения требуемого фазового сдвига.

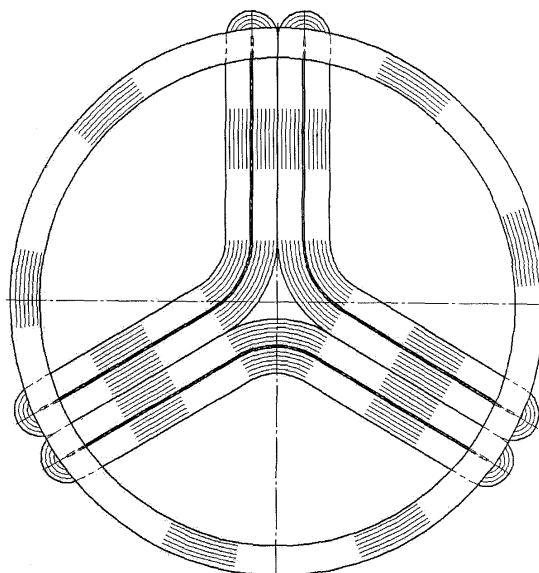


Рис. 2. Магнитопровод из трех радиально расположенных стержней

Необходимость соединения вторичных обмоток разных фаз отсутствует в МВТ с вращающимся магнитным полем. Магнитопровод МВТ с вращающимся магнитным полем выполняется цилиндрическим по аналогии с магнитопроводом статора асинхронного двигателя.

Один из первых трансформаторов на основе использования вращающегося магнитного поля был предложен в [12]. Он был назван «суммирующим трансформатором» (a rotating field summing transformer). Магнитопровод трансформатора содержит два цилиндрических сердечника, набранных из кольцевых дисков. На внешнем цилиндрическом сердечнике расположена первичная трехфазная обмотка по типу обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя. На внутреннем диске располагаются вторичные трехфазные обмотки.

Трансформатор на основе использования вращающегося магнитного поля для многоуровневого инвертора был запатентован фирмой Siemens [13]. Магнитопровод такого трансформатора состоит из внутреннего (центрального) и внешнего сердечников, которые жестко закреплены относительно друг друга (рис. 3). Сердечники имеют множество пазов. Трансформатор содержит первичную обмотку на внешнем сердечнике и 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 с магнитопроводом на основе конструкции статора трехфазных ЭД.

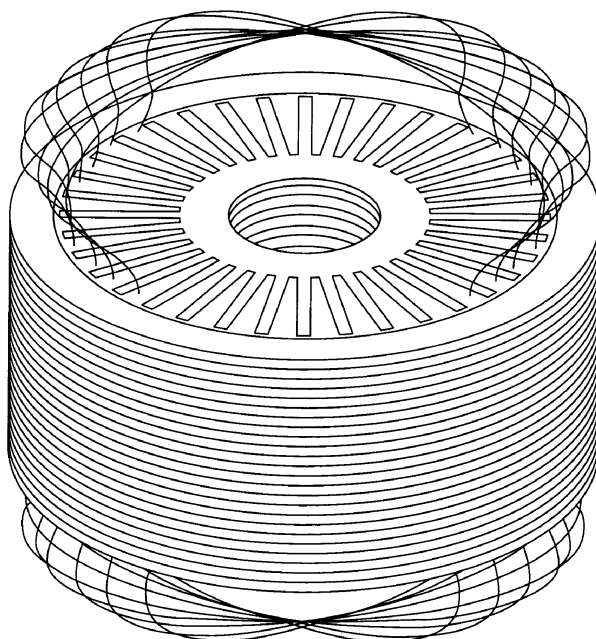


Рис. 3. Многообмоточный трансформатор с вращающимся магнитным полем

В настоящее время МВТ с вращающимся магнитным полем выпускаются компаниями Siemens, Toshiba, Mitsubishi Electric и другими. Так МВТ с вращающимся магнитным полем используется в высоковольтных преобразователях частоты серии MELTRAC-F500HV (на напряжение 6 кВ) фирмы Mitsubishi Electric и преобразователях частоты TМdrive, производимых совместно компаниями

Toshiba и Mitsubishi Electric, и предназначенных для применения в системах автоматического управления трехфазными асинхронными электродвигателями на напряжение 6, 10 кВ с диапазоном мощностей от сотен киловатт до десятков мегаватт.

Первичная обмотка трансформатора в преобразователях частоты TМdrive выполнена таким образом, что при подаче на нее входного напряжения, она создает круговое вращающееся поле. Вторичные обмотки разделены на три группы – по шесть обмоток в группе. Фазовый сдвиг между соседними обмотками в группе составляет 10° . Это достигнуто за счет геометрического смещения в пространстве осей обмоток на 10° . Фазовый сдвиг между первой и шестой обмотками группы составляет 50° . Фазовый сдвиг между первыми вторичными обмотками в группе составляет 120° .

Трансформатор данной конструкции обладает более высоким КПД по сравнению с обычным многостержневым трансформатором, что позволяет увеличить КПД ПЧ в целом. При номинальных частоте и нагрузке ПЧ TМdrive имеет КПД порядка 98%. На рис. 4 показана зависимость КПД преобразователя (с учетом трансформатора) от скорости вращения двигателя.

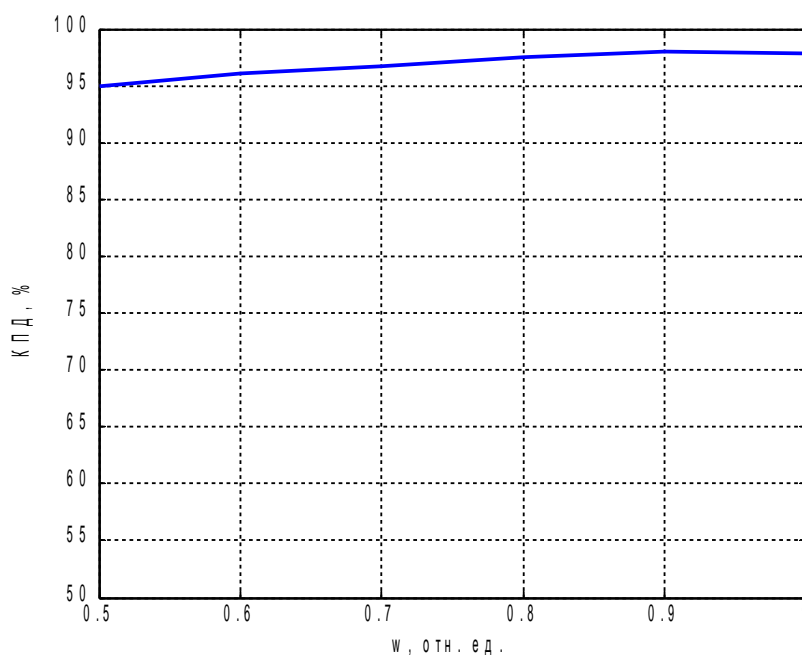


Рис. 4. Зависимость КПД преобразователя от скорости вращения двигателя

Ток, потребляемый из сети трансформатором с вращающимся магнитным полем, имеет практически синусоидальный характер по двум причинам. Во-первых, симметричная конструкция входного трансформатора с вращающимся магнитным полем позволяет более равномерно загружать фазы первичной обмотки и

питающую сеть. При этом отсутствует несимметрия магнитных потоков, характерная для стержневых трансформаторов. Во-вторых, ток каждой из фаз первичной обмотки складывается из суммы приведенных токов вторичных обмоток. При этом, за счет сдвига по фазе токов во вторичных обмотках, происходит компенсация влияния токов высших гармоник. Другим достоинством МВТ с вращающимся магнитным полем является отсутствие сложных соединений между вторичными обмотками разных фаз, что делает их более надежными по сравнению со стержневыми МВТ. В то же время конструкция магнитопровода у МВТ с вращающимся магнитным полем имеет более сложную конфигурацию и менее технологична в изготовлении. Кроме того, в МВТ с вращающимся магнитным полем на центральный магнитопровод с вторичными обмотками действует электромагнитный вращающий момент, что необходимо учитывать при оценке надежности.

Благодаря использованию на входе ПЧ многоуровневого трансформатора с вращением фаз вторичного напряжения, коэффициент мощности по данным фирмы Mitsubishi Electric составляет не менее 0,95. Таким образом, не требуется применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности. Преобразователи сохраняют коэффициент полезного действия и коэффициент мощности на номинальном уровне при регулировании частоты выходного напряжения вниз до 30 % от номинальной частоты. КПД преобразователя частоты TМdrive составляет около 98 %, а диапазон регулирования выходной частоты 1:50.

Общим недостатком МВТ является высокая стоимость, сложность реализации конструкции и алгоритма управления ПЧ, существенные потери энергии в прямых транзисторных переходах из-за большого числа ключевых элементов, особенно при высокой частоте модуляции, и значительные габаритные размеры. При построении алгоритма работы многоуровневого ПЧ мощность, потребляемая от всех выходных обмоток трансформатора, должна быть одинакова, в противном случае ухудшается симметрия магнитного поля и повышается уровень высших гармоник. Кроме того, одни обмотки могут быть недогружены, а другие могут перегреваться. Решают такую проблему строго синхронным управлением, при котором временные диаграммы работы всех инверторных ячеек одинаковы, со сдвигом на половину периода выходной частоты от ячейки к ячейке [14]. Однако при таком способе управления мощность, потребляемая от обмоток трансформатора, будет одинаковой лишь в тех случаях, когда коэффициент мощности близок к единице, нагрузка двигателя постоянна, и не происходит никаких переходных процессов. На практике нагрузка электродвигателей и их коэффициент мощности изменяются. При этом свойства многоуровневых ПЧ с МВТ будут зависеть от нагрузки и скорости вращения двигателей.

Выводы

1. В статье предложена классификация МВТ по конструктивному исполнению, принципу действия и способу получения фазового сдвига между напряжениями вторичных обмоток. По конструктивному исполнению магнитопроводов и размещению обмоток все разновидности МВТ для многоуровневых инверторов можно разбить на МВТ с расположением обмоток на параллельных стержнях или стержневые МВТ; МВТ с размещением обмоток на радиальных стержнях (радиальные МВТ) и МВТ с цилиндрическими магнитопроводами. По принципу действия предложено выделять МВТ с трансформаторной ЭДС или трансформаторы с неподвижным магнитным полем, и МВТ с ЭДС вращения, или трансформаторы с вращающимся магнитным полем. По способу получения фазового сдвига между напряжениями двух смежных вторичных обмоток можно выделить два основных типа МВТ: входные трансформаторы, в которых фазовый сдвиг достигается за счет соответствующего соединения вторичных обмоток разных фаз, и МВТ, в которых фазовый сдвиг достигается пространственным смещением вторичных обмоток.

2. Основным достоинством стержневых МВТ с неподвижным магнитным полем является простота конструкции магнитопровода. В то же время они имеют ряд недостатков, основными из которых являются: несимметрия магнитной цепи, что нарушает равенство напряжений вторичных обмоток и ухудшает гармонический состав магнитного потока, и сложность выполнения многочисленных соединений между вторичными обмотками разных фаз, что снижает надежность стержневого трансформатора.

3. Характер потребления тока из сети трансформатором с вращающимся магнитным полем практически чисто синусоидальный. Другим достоинством МВТ с вращающимся магнитным полем является отсутствие сложных соединений между вторичными обмотками разных фаз. В то же время конструкция магнитопровода у МВТ с вращающимся магнитным полем более сложная и менее технологична в изготовлении.

4. При разработке алгоритма работы многоуровневого ПЧ необходимо обеспечивать равенство мощностей, потребляемых от всех выходных обмоток МВТ, в противном случае ухудшается симметрия магнитного поля и повышается уровень высших гармоник. Кроме того, одни обмотки могут быть недогружены, а другие могут перегреваться.

При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по комплексному проекту «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (договор №13.G25.31.0060).

Литература

1. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти: учеб. пособие. Уфа: изд-во УГНТУ, 2009. 156 с.
2. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Электроснабжение нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов: учебное пособие. Уфа: ООО «Монография», 2010. 272 с.
3. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992. 296 с.
4. US Patent 6229722. Multiple inverter system. Ichikawa K., Hirata A., Kawakami K., Satoh K. Issue date: May 8, 2001.
5. US Patent 5625545. Medium voltage PWM drive and method / Hammond P.W. Issue date: April 29, 1997.
6. Мартыненко В., Гришанин А., Лебедева Л., Максимова С., Вовк Л., Варянова Г. Новая серия мощных биполярных модулей с повышенным быстродействием для частотно-регулируемого электропривода // Силовая электроника. 2011. № 1. С. 66 - 68.
7. Патент № 2396625 РФ. Трансформатор / Казаков В.В., Вафин Ш.И. // 11.12.2008 г.
8. Казаков В.В. Силовые MTS-трансформаторы и генераторы // Энергетика Татарстана, 2007. № 3. С. 44 - 55.
9. Костенко М.П. Электрические машины. М.-Л.: Энергия, 1969. 364 с.
10. Патент № 2125749 РФ. Многофазный агрегатированный трансформатор / Атрощенко В.А., Гайтов Б.Х., Сингаевский Н.А. и др. // 17.09.1997 г.
11. Патент № 46630 Украины // 15.03.2005 г.
12. US Patent 5317299. Electromagnetic transformer / Dhyanchand P. J., Vaidya J., Mokadam R., Arbanella R. Issue date: May 31, 1994.
13. US Patent 7948340. Three-phase multi-winding device / Rastogi M., Osman R.H., Hammond P.W., Aiello M.F. Issue date: May 24, 2011.
14. Сидорин А.Е., Родин Я.Н. Алгоритм распределения нагрузки обмоток входного трансформатора высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты // Электротехнические комплексы и системы управления, 2007. № 1. С. 63-65.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS
FOR INPUT MULTIWINDING TRANSFORMER
MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTERS**

Shabanov V.A., Hakimyanov M.I.

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
e-mail: ¹joss22@rambler.ru*

Abstract. *This article gives an analytical overview of the existing multiwinding input transformers for multilevel inverters, which in recent years increasingly become applicable to the oil and gas industry. The classification of input multiwinding transformers on a design and method for producing a phase shift. We consider the advantages and disadvantages multiwinding input transformers of different types with respect to the frequency-controlled electric drives in oil and gas industry.*

Keywords: *multilevel high-voltage frequency converter, high-voltage variable speed drive, multiwinding input transformers, oil and gas industry*

References

1. Shabanov V.A. Osnovy reguliruemogo elektroprivoda osnovnykh mekha-niz-mov bureniya, dobychi i transporta nefi: ucheb. posobie (Fundamentals of variable frequency drive of main mechanisms at drilling, production and transportation of oil). Ufa, UGNTU, 2009. 156 p.
2. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu. Elektrosnabzhenie nefteperekachivayushchikh stantsii magistral'nykh nefteprovodov: ucheb. posobie (Power supply pump stations of pipeline. Textbook). Ufa, Monografiya, 2010. 272 p.
3. Rozanov Yu.K. Osnovy silovoi elektroniki (Fundamentals of Power Electronics). Moscow, Energoatomizdat, 1992. 296 p.
4. US Patent 6229722. Multiple inverter system. Ichikawa K., Hirata A., Kawakami K., Satoh K. Issue date: May 8, 2001.
5. US Patent 5625545. Medium voltage PWM drive and method / Hammond P.W. Issue date: April 29, 1997.
6. Martynenko V., Grishanin A., Lebedeva L., Maksutova S., Vovk L., Varyanova G. Novaya seriya moshchnykh bipolyarnykh modulei s povyshennym bystro-deistviem dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda (A new series of high-power high-speed bipolar modules for variable frequency drive), *Silovaya elektronika*, 2011, Issue 1, pp. 66 - 68.
7. Patent 2396625 Russian Federation. Transformer / Kazakov V.V., Vafin Sh.I. Appl. 11.12.2008. Publ. 10.08.2010.
8. Kazakov V.V. Silovye MTS-transformatory i generatory (Power MTS-transformers and generators), *Energetika Tatarstana*, 2007, Issue 3, pp. 44 - 55.
9. Kostenko M.P. Elektricheskie mashiny (Electrical machines). Moscow, Leningrad, Energiya, 1969. 364 p.

10. Patent 2125749 Russian Federation. Modular multiphase transformer / Atroshchenko V.A., Gajtov B.Kh., Singaevskij N.A. et. al. Appl. 17.09.1997. Publ. 27.01.1999.
11. Patent 46630 Ukraine. 15.03.2005.
12. US Patent 5317299. Electromagnetic transformer / Dhyanchand P. J., Vaidya J., Mokadam R., Arbanella R. Issue date: May 31, 1994.
13. US Patent 7948340. Three-phase multi-winding device / Rastogi M., Osman R.H., Hammond P.W., Aiello M.F. Issue date: May 24, 2011.
14. Sidorin A.E., Rodin Ya.N. Algoritm raspredeleniya nagruzki obmotok vkhodnogo transformatora vysokovol'tnogo mnogourovnevnogo preobrazovatelya chastoty (Load balancing algorithm for windings of input transformer in high-voltage multilevel inverter), *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*, 2007, Issue 1, pp. 63 - 65.