

УДК 621.31 (0.75.8)

ВХОДНЫЕ МНОГООБОМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ*

Хакимьянов М.И.¹, Шабанов В.А.

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

***Аннотация.** В статье рассмотрены принципы выполнения входных многообмоточных трансформаторов для высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты. На основе анализа отечественных и зарубежных патентов рассмотрены достоинства и недостатки многообмоточных входных трансформаторов, имеющих различные типы магнитопроводов и отличающиеся принципом действия. Предложена конструкция входного трансформатора для многоуровневых преобразователей частоты, предназначенных для регулирования синхронных электродвигателей.*

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

В последние годы во всех отраслях промышленности наблюдается вытеснение нерегулируемых электродвигателей частотно-регулируемыми электроприводами. Замена нерегулируемого электропривода на частотно-регулируемый позволяет не только получить значительную экономию электроэнергии, но и поднять уровень автоматизации и оптимизацию технологических процессов на качественно иной уровень. Это особенно важно в таких энергоемких отраслях промышленности, как трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов, нефтегазодобыча, нефтехимия и нефтепереработка [1].

Область использования частотно-регулируемого электропривода и достижение экономического эффекта во многом определяются свойствами преобразователей частоты (ПЧ), которые являются очень сложными и дорогостоящими изделиями. Интерес к частотно-регулируемому электроприводу повысился с появлением многоуровневых ПЧ [2]. Многоуровневые преобразователи частоты (МУПЧ) обладают такими достоинствами, как близкая к синусоидальной форма выходного напряжения, низкий уровень гармоник, вносимых в питающую сеть, сохранение работоспособности при повреждении отдельных силовых ячеек в составе ПЧ.

Одним из наиболее сложных, ответственных и дорогостоящих узлов МУПЧ является входной трансформатор, называемый многофазным или многооб-

* 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).

моточным. Благодаря специальной конструкции магнитопровода и вторичных обмоток, трехфазное входное напряжение преобразуется в несколько трехфазных выходных напряжений, сдвинутых относительно друг друга по фазе на небольшой угол [3].

Принцип получения трехфазных напряжений со сдвигом фаз иллюстрирует схема, приведенная на рис. 1 [4]. На рисунке показано соединение вторичных обмоток по схеме «треугольник-зигзаг». Возможно соединение вторичных обмоток и по другим схемам. Обмотки трансформатора, как показано на рис. 2, размещаются на трехстержневом магнитопроводе.

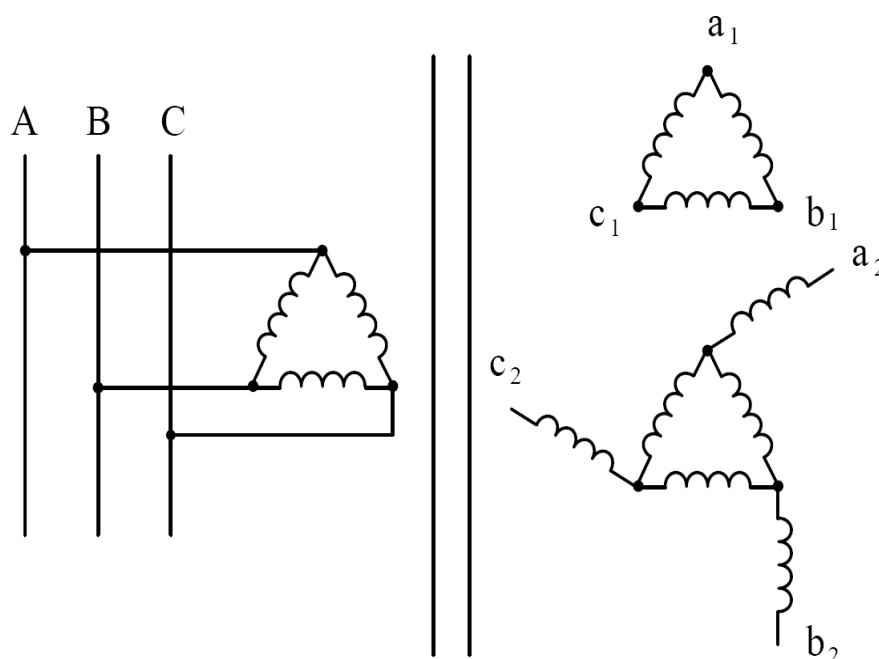


Рис. 1. Соединение обмоток входного трансформатора

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

Схема МУПЧ с многообмоточным трансформатором, предложенная фирмой «Toshiba» в патенте США № 6229722 «Многоинверторная система», приведена на рис. 3. Многоуровневый ПЧ включает в себя входной многообмоточный трансформатор, к вторичным обмоткам которого подключены соединенные последовательно силовые ячейки инвертора.

Такой тип входных трансформаторов широко используется в МУПЧ различных производителей. 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. Несимметрия фазных магнитных потоков обостряет проблему снижения уровня высших гармоник, генерируемых МУПЧ в питающую сеть.

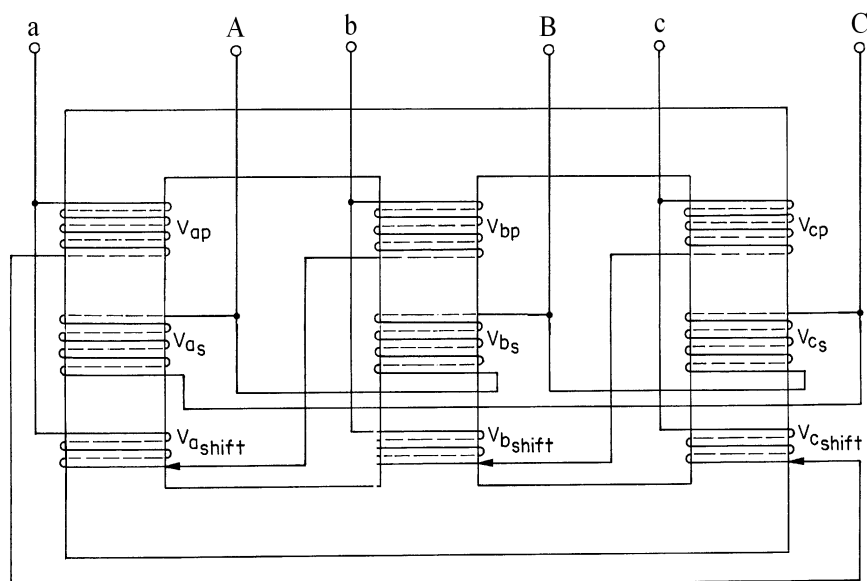


Рис. 2. Плоский трехстержневой трансформатор для МУПЧ

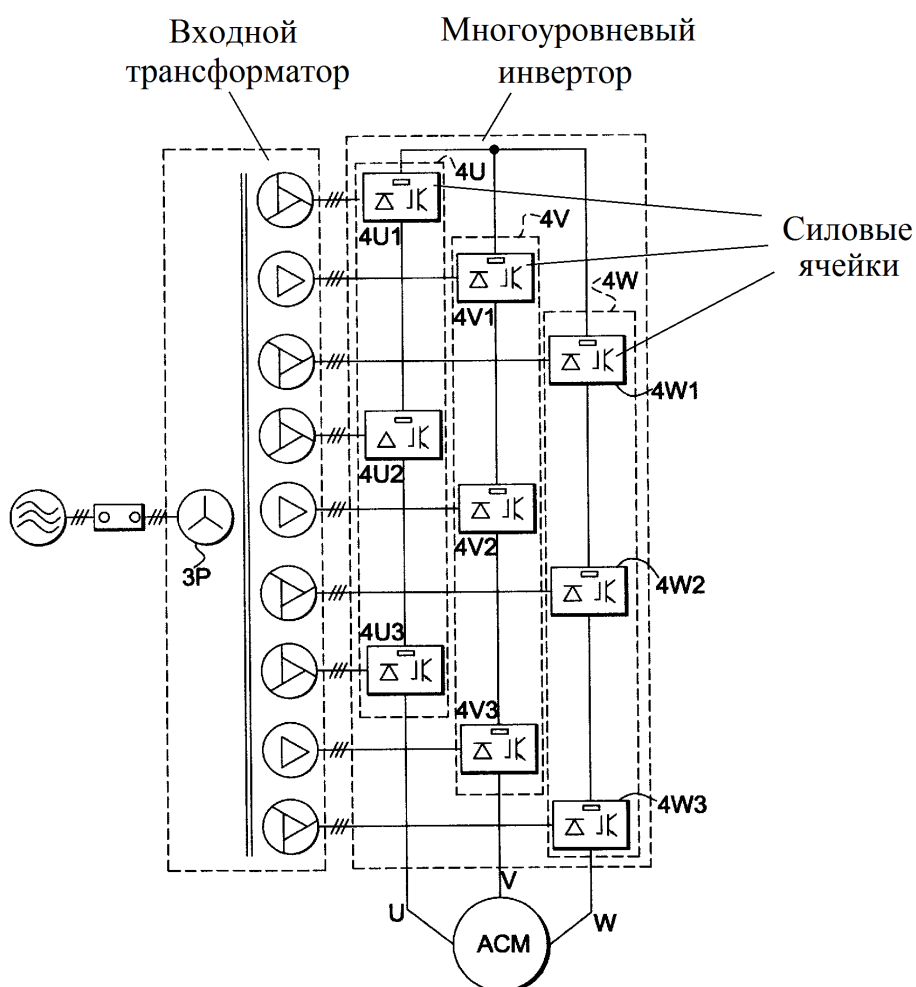


Рис. 3. Многоинверторная система фирмы Toshiba, патент США № 6229722

Снизить уровень несимметрии можно, например, увеличив число стержней. Можно выполнить магнитопровод не из трех, а из четырех параллельных стержней [5]. Каждый из четырех стержней 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 позволяет обеспечить фазную симметрию трансформатора, сохранив плоскую конструкцию магнитопровода. Однако такое решение усложняет как конструкцию магнитопровода, так и выполнение первичной трехфазной обмотки, которая размещается на нескольких стержнях.

Другой путь добиться симметрии фаз – выполнить входной многообмоточный трансформатор на магнитопроводе, аналогичному по конструкции магнитопроводу трехфазного электродвигателя. Первичная трехфазная обмотка располагается на магнитопроводе статора, а вторичные обмотки – на заторможенном роторе. Принцип действия такого входного трансформатора основан на использовании вращающегося магнитного поля. 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, размещенные соответственно на внешнем и внутреннем сердечниках для создания вращающегося электромагнитного поля (рис. 4). При подаче на первичную обмотку трехфазного напряжения образуется вращающееся магнитное поле, которое создает во вторичных обмотках несколько трехфазных напряжений. Первичная и вторичная обмотки соединяются в звезду или в треугольник.

Вращающееся магнитное поле является симметричным по отношению к любой из вторичных обмоток. В этом главное преимущество трансформаторов на основе магнитопроводов, аналогичных конструкции статора трехфазных электродвигателей. Аналогичный входной трансформатор запатентован фирмой Siemens (патент США № 7948340 «Трехфазный многообмоточный трансформатор») в 2008 году.

Еще один способ добиться фазной симметрии – это выполнить магнитопровод из трех радиально расположенных под углом 120° стержней. 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 (рис. 5). При таком конструктивном выполнении магнитопровода обеспечивается полная симметрия фаз, что позволяет существенно повысить технические характеристики.

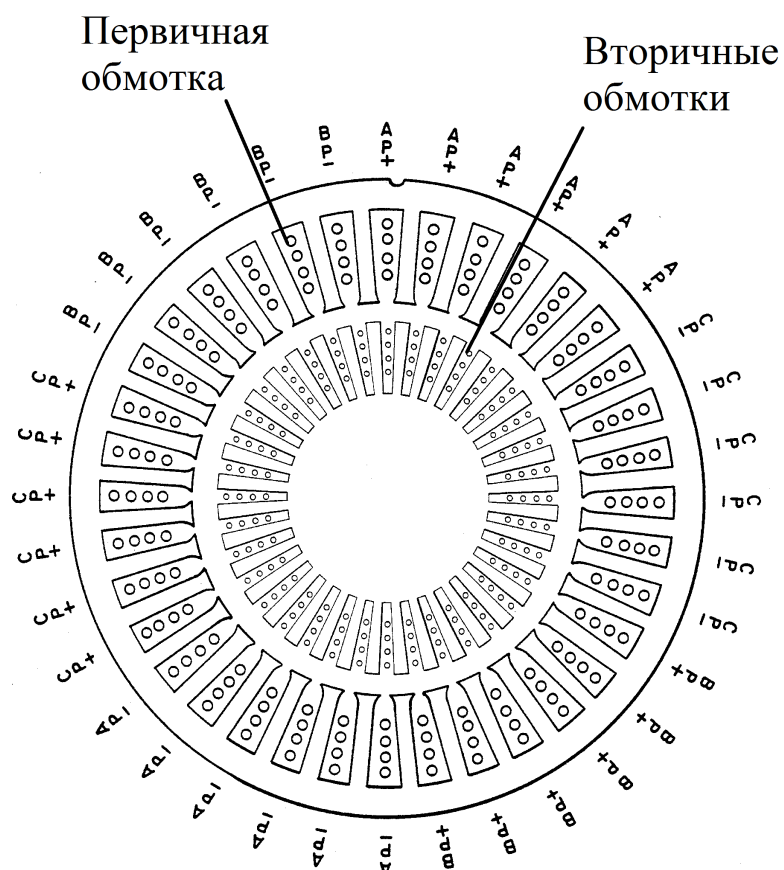


Рис. 4. Многообмоточный трансформатор на основе использования вращающегося магнитного поля, патент США № 5317299

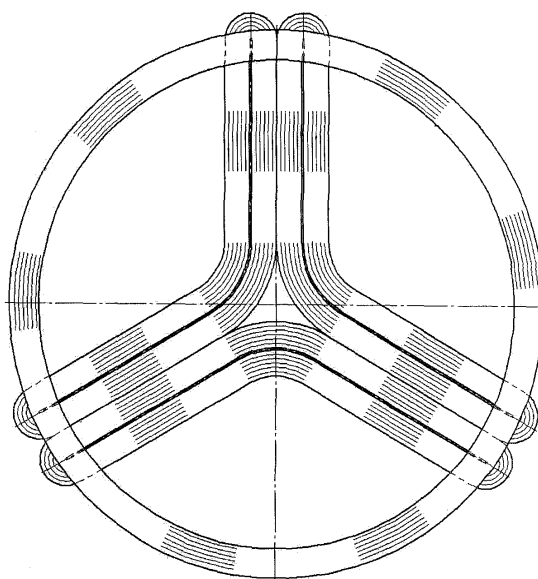


Рис. 5. Магнитопровод с радиальным расположением стержней и кольцевым ярмом, патент РФ № 2398300

По сравнению с трансформатором с вращающимся магнитным полем здесь упрощается конструкция и технология изготовления магнитопровода, а по сравнению с трехстержневыми трансформаторами плоской конструкции – обеспечивается симметрия магнитной цепи. 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 – до 12,5 МВт [6, 7]. 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 плоским трехстержневым магнитопроводом и с вращающимся магнитным полем на основе магнитопроводов трехфазных электродвигателей.

Недостатком известных многообмоточных трансформаторов для МУПЧ устройства является отсутствие схемы формирования тока для питания обмотки возбуждения синхронного электродвигателя. В [8] предложено решение, при котором в многообмоточный силовой трансформатор, число вторичных обмоток которого соответствует числу частотных преобразователей в составе многоуровневого инвертора, вводится дополнительная вторичная обмотка, к которой подключается возбудительное устройство для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя (рис. 6). Причем возбудительное устройство входит в состав МУПЧ и управляется от системы управления ПЧ одновременно с инверторами силового блока.

При таком исполнении входного трансформатора и МУПЧ исключается необходимость использования внешнего устройства возбуждения синхронного электродвигателя, а также улучшается качество поддержания заданного коэффициента мощности, значение которого формируется в зависимости от частоты и напряжения на выходе ПЧ в соответствии с требуемым законом частотного управления. В результате происходит одновременное регулирование как частоты и напряжения питания статорной обмотки синхронного электродвигателя, так и тока возбуждения. Питание схемы формирования регулируемого тока возбуждения от дополнительной трехфазной обмотки многообмоточного трансформатора позволяет отказаться от использования отдельного трансформатора, уменьшить габаритные размеры системы, повысить надежность за счет исключения преобразовательного трансформатора, коммутационной аппаратуры и кабельных линий и снизить уровень электромагнитных помех, вносимых в электрическую сеть. Управление схемой формирования регулируемого тока возбуждения обеспечивает поддержание в электрической сети предприятия необходимого значения коэффициента мощности.

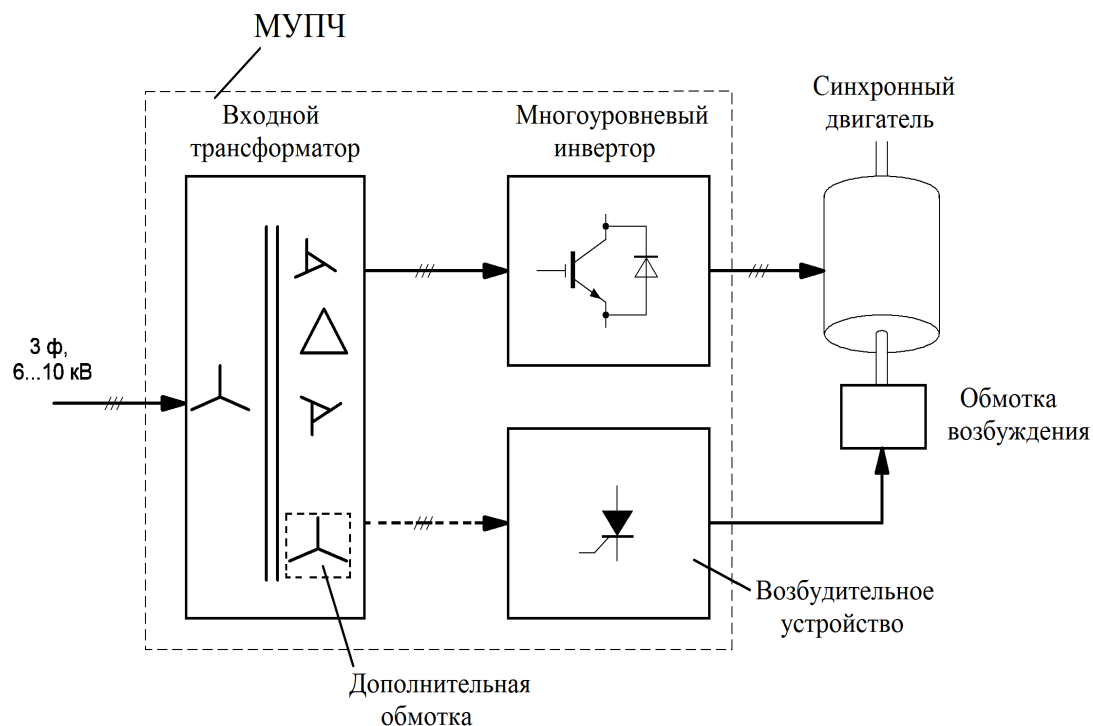


Рис. 6. МУПЧ с дополнительной обмоткой входного трансформатора для питания возбудительного устройства

Выводы

1. Разработка новых конструкций входных многообмоточных трансформаторов для многоуровневых инверторов является актуальной проблемой. В настоящее время большинство МУПЧ выполняются с входными трансформаторами на плоском трехстержневом магнитопроводе, либо на основе магнитопроводов трехфазных электродвигателей. В обоих случаях число вторичных обмоток входного трансформатора соответствует числу частотных преобразователей в составе многоуровневого инвертора. Однако при использовании такого МУПЧ для регулирования частоты вращения синхронных двигателей требуется установка отдельного трансформатора для питания обмотки возбуждения с отдельной системой управления.

2. Для МУПЧ, предназначенных для синхронных двигателей, перспективными являются многофазные входные трансформаторы с дополнительной вторичной обмоткой для питания возбудительного устройства. Питание схемы формирования регулируемого тока возбуждения от дополнительной трехфазной обмотки входного многообмоточного трансформатора позволяет отказаться от использования отдельного трансформатора в цепи возбуждения, уменьшить габаритные размеры системы, повысить надежность и осуществлять управление током возбуждения от системы управления ПЧ.

Литература

1. Федотов А.Б., Токмаков Д.А., Левшин В.П., Шабанов В.А. Проект «Разработка и организация серийного производства ВЧРП» – цель, назначение и основные ожидаемые результаты // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции (с международным 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 // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции (с международным 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. Patent US6340851. Modular transformer arrangement for use with multi-level power converter / Rinaldi P.M., Thaxton E.S., Castles G. Filing date: Dec 28, 1999. Issue date: Jan 22, 2002.

5. Патент № 2396625 РФ. Трансформатор / Казаков В.В., Вафин Ш.И. Заявка: 11.12.2008. Опубликовано: 10.08.2010.

6. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Электроснабжение нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов: учебное пособие. Уфа: ООО «Монография», 2010. 272 с.

7. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы нефтегазовой промышленности: учебник для вузов. М.: Недра, 2000. 487 с.

8. Патент на полезную модель № 122215 РФ. Статический многоуровневый преобразователь частоты для питания синхронных электродвигателей / Шабанов В.А., Хакимьянов М.И., Бондаренко О.В. Дата подачи заявки: 08.06.2012. Опубликовано: 20.11.2012.

INPUT MULTIWINDING TRANSFORMERS FOR MULTILEVEL INVERTERS

M.I. Hakimyanov¹, V.A. Shabanov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: ¹joss22@rambler.ru

Abstract. *The principles of input multiwinding transformers for high voltage multilevel converter are described. The advantages and disadvantages of multiwinding input transformers with different types of magnetic and different operating principle are considered. A design of the input transformer for the inverter running synchronous motor is given.*

Keywords: *multiwinding input transformers, multilevel inverters, high-voltage frequency-adjustable electric drive, magnetic core*

References

1. Fedotov A.B., Tokmakov D.A., Levshin V.P., Shabanov V.A. Proekt "Razrabotka i organizatsiya seriinogo proizvodstva VCHRP" – tsel, naznachenie i osnovnye ozhidaemye rezultaty (The project "Development and organization of production VCHRP" – the goal, purpose and main expected results), *Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sbornik nauchnykh trudov III Vserossiiskoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of III All-Russian technical Conference "Electrotechnologies, electric drives and electric installations of enterprises")*. Ufa, UGNTU, 2011. PP. 3-10.

2. Guzeev B.V., Khakim'yanov M.I. obzor sovremennykh vysokovol'tnykh preobrazovatelei chastoty dlya asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei (Review of modern high-voltage inverters for asynchronous and synchronous motor), *Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. trudov III Vserossiiskoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of III All-Russian technical conference "Electrotechnologies, electric drives and electric installations of enterprises")*. Ufa, UGNTU, 2011. PP. 42-53.

3. Guzeev B.V., Khakim'yanov M.I. Sovremennyye promyshlennyye vysokovol'tnyye preobrazovately chastoty dlya regulirovaniya asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei (Modern industrial high-voltage variable speed drives for adjusting of synchronous and asynchronous motors), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2011, Issue 3, pp. 441 - 449.

http://www.ogbus.ru/authors/Guzeev/Guzeev_1.pdf

4. Patent US 6340851. Modular transformer arrangement for use with multilevel power converter / Rinaldi P.M., Thaxton E.S., Castles G. Filing date: Dec 28, 1999. Issue date: Jan 22, 2002.

5. Patent № 2396625 of Russian Federation. Transformer / Kazakov V.V., Vafin Sh.I. Appl.: 11.12.2008. Publ.: 10.08.2010.

6. 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.

7. Men'shov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. Elektricheskie ustanovki i komplekсы neftegazovoi promyshlennosti: ucheb. dlya vuzov (Electrical installations and complexes of the oil and gas industry. Textbook). Moscow, Nedra, 2001. 487 p.

8. Utility patent № 122215 of Russian Federation. (Static multi-level inverter for powering synchronous motors / Shabanov V.A., Khakim'yanov M.I., Bondarenko O.V. Appl.: 08.06.2012. Publ.: 20.11.2012.