

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ»**

**SIMULATION OF MECHATRONIC SYSTEMS AND ELECTRIC DRIVE  
WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS, ELECTROMECHANICAL AND  
ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND DEVICES**

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422  
УДК 519.8, 621.31

А.А. Тяпин<sup>1,2</sup>, Е.С. Кинев<sup>2</sup>  
(г. Красноярск, <sup>1</sup>Сибирский федеральный университет,  
<sup>2</sup>ООО Тепловые электрические системы)  
А.А. Tyapin<sup>1,2</sup>, E.S. Kinev<sup>2</sup>  
(Krasnoyarsk, <sup>1</sup>Siberian Federal University, <sup>2</sup>Thermal Electrical Systems Ltd.)

**IGBT-ИНВЕРТОР С БИПОЛЯРНОЙ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ШИМ  
ДЛЯ ДВУХФАЗНОЙ ЛИНЕЙНОЙ МГД-МАШИНЫ**

**IGBT INVERTER WITH BIPOLAR SINUSOIDAL PWM  
FOR TWO PHASE LINEAR MHD MACHINE**

*Рассмотрены результаты моделирования электромагнитного режима двухфазного двухуровневого транзисторного инвертора при работе на укороченную линейную металлургическую МГД-машину.*

*The results of modeling the electromagnetic mode of a two-phase two-level transistor inverter when working on a shortened linear metallurgical MHD machine are considered.*

*Ключевые слова: транзисторный IGBT-инвертор, линейная МГД-машина, моделирование силовых цепей, двухфазная четырёхзонная обмотка.*

*Keywords: transistor IGBT inverter, linear MHD machine, modeling of power circuits, two-phase four-zone winding.*

**Введение.** Транзисторные инверторы с регулируемой частотой тока получили широкое распространение в качестве источников питания индукционных машин (ИМ) для металлургии [1]. Это обусловлено их неоспоримыми достоинствами, экономичностью, невысокой стоимостью, надёжностью и несложной схемотехникой. Структура транзисторного частотного преобразователя уже стала классической и содержит входной выпрямитель с модулем сброса мощности, звено постоянного тока с накопителем энергии и силовое выходное звено – IGBT-инвертор. Исполнительные органы подобных комплексов – индукционные устройства (индукторы) с обмотками могут быть весьма разнообразными, например двухфазными, учитывая их применение в качестве линейных машин [2].

Такая особенность заставляет более внимательно отнестись к разработке инверторов, изменению их аппаратного оснащения, коррекции алгоритмов управления и модификации защит [3].

**Постановка задачи.** Специфика конструкции укороченных индукционных машин с магнитосвязанными обмотками и разомкнутым магнитопроводом [4] обуславливает несимметрию токов и магнитных потоков в индукторе комплекса электромагнитного перемешивания (ЭМП) расплава алюминия в печах. Искажение картины магнитного поля приводит к ухудшению тяговых характеристик индукторов и может быть скорректировано регулированием режима фаз источника питания [5]. Несмотря на дешевизну, применение традиционной трехфазной структуры силового звена преобразователя для двухфазной нагрузки приводит к неуравновешенности системы электропитания. Поэтому требуется предложить структуру двухфазного инвертора с возможностью независимого раздельного управления амплитудно-фазовыми характеристиками токов по упрощенным алгоритмам в разомкнутом контуре управления МГД-машиной.

**Решение.** Для перемешивателей среднего габарита с эквивалентным коэффициентом мощности 0,05 – 0,1 на частоте около 1 Гц используют частотные преобразователи, мощностью до 250 кВА при токах 50-250 ампер и напряжениях до 400 вольт. На первом этапе выполняют поиск оптимальных параметров электромагнитного поля индуктора по критерию наибольшего тягового усилия в расплаве. Для этого применяют математическое моделирование, согласно результатам которого, синтезируют инвертор. При выборе структуры силового звена применяют как трехплечевые, так и четырехплечевые схемы включения модулей [6]. Для гальванической развязки обмоток и упрощения алгоритма управления транзисторами, в двухфазном исполнении, более предпочтительно применить два независимых транзисторных моста. Независимое, согласованное управление амплитудно-фазовыми характеристиками силового звена удобно выполнить на основе двухполярной синусоидальной ШИМ [7, 8].

Некоторые результаты моделирования бегущего магнитного поля показаны на рис. 1. Эскиз модели в среде Maxwell показан на рис. 1, а. Картина векторного поля на днище ванны с расплавом алюминия представлена на рис. 1, б. Мгновенный срез вращающегося поля распределенных векторов объемной силы и плотности тока в расплаве при фазовом угле  $+@/2$  обычно отображается цветными векторами. Интенсивность дифференциальных параметров соответствует цветовому тону, а конкретные значения показаны в таблицах на рис. 1, б.

По результатам моделирования поля для идеализированных условий первой итерации переходят к построению модели инвертора и исследованию его режимов с учетом характеристик обмотки, сердечника и рабочего тела.

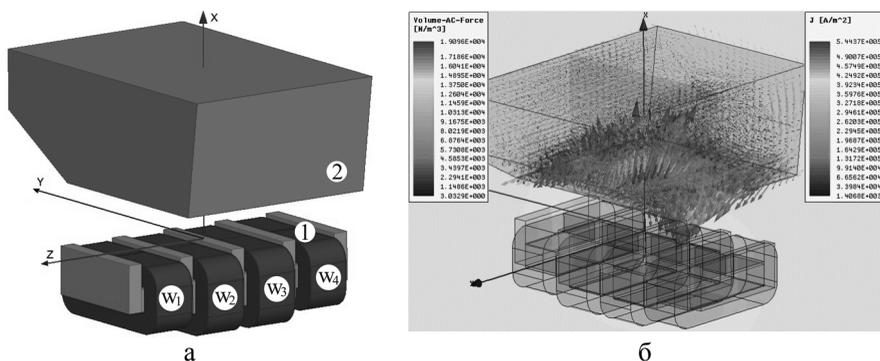


Рис. 1. Моделирование бегущего магнитного поля МГД-машины

ИМ чаще изготавливают в трёхзонном или четырёхзонном исполнении. Это обусловлено спецификой размещения двухходовых катушек на магнитопроводе [9]. В четырёхзонной конструкции (рис. 1) индукционная МГД-машина имеет четыре сосредоточенные обмотки, по 10 - 12 катушечных групп в каждой, локализованные между пятью зубцами. В такой конфигурации предусмотрено включение двухфазной обмотки с параметрами: число фаз  $m = 2$ , число пар полюсов  $2p = 2$ , число зубцов  $Z = 5$ , фазная зона МДС  $\alpha = 90$ .

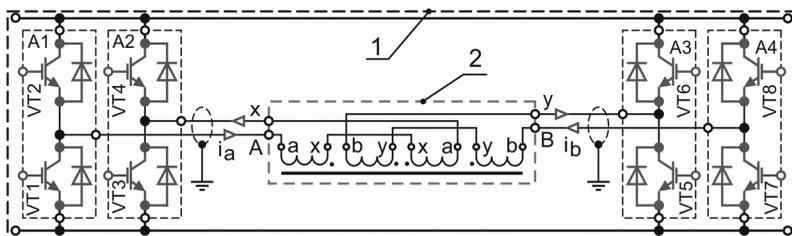


Рис. 2. Подключение двухфазного инвертора к четырёхзонной ИМ

Представленная на рис. 2 конфигурация силового модуля годится как для совмещенного исполнения индуктора с инвертором под печью, так и для отдельного модульного изготовления инвертора и размещения силового шкафа на площадке перед печью. Схема подключения силового звена частотного инвертора [10], построенного по четырехплечевой схеме на базе полюстов (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, и A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>), к двухфазному четырехзонному индуктору показана на рис. 1. Силовой модуль обозначен – 1, индукционная машина – 2. В предложенной конфигурации выполнен переход с упрощением от трёхплечевой схемы, удобной при трёхфазной системе токов к отдельному согласованному питанию по фазам, аналогичному четырехплечевой структуре [6, 11].

Пример структурной модели с выпрямителем, инвертором индуктором и системой управления на этапе синтеза показан на рис. 3. Для построения силового звена удобно использовать как средства соответствующих подсистем сред Maxwell или Ansys [3, 5], так и специализированное программное обеспечение Matlab Simulink [12]. С применением представленной модели выполняют разработку стратегии управления ключами, исследование состояний электрической схемы выпрямителя (ускоренного заряда - блок 3, перенапряжений звена постоянного тока, аварийного сброса мощности) и инвертора, а также определение основных интегральных параметров установившегося режима.

В структуре функции управления  $u=f(U, \Theta)$  реализуются уравнения:

$$u_a^* = \sqrt{2}U_s \sin \Theta_e, \quad u_b^* = \sqrt{2}U_s \sin(\Theta_e - \pi/2).$$

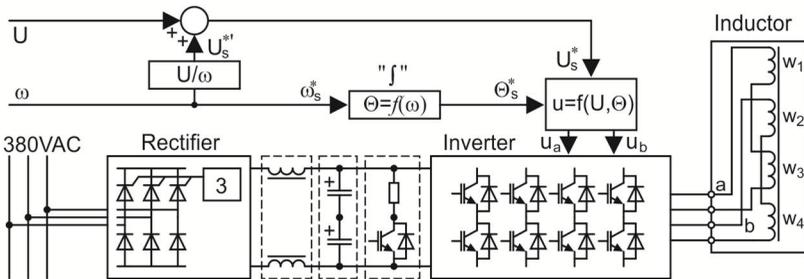


Рис. 3. Структура модели инвертора с двухфазной ИМ

При таком двухфазном питании сравнительно мощного индукционного оборудования есть возможность развязать фазы, поэтому по соображениям гибкости регулирования применять модификации трехплечевых схем и алгоритмов управления транзисторными модулями нецелесообразно. Последовательность переключения элементов силового модуля, учитываемую в алгоритмах управления [6, 10, 13], можно показать на примере работы мостового модуля. В анализе ШИМ-переключения транзисторов  $Q_{1-4}$  на рис. 4 следует учитывать состояние затвора (on/off) каждого ключа. Проводящее состояние элемента выделено жирным цветом, а выключенное состояние соответствует бледному изображению [14, 15]. Двухфазная схема силового звена, на базе согласованной пары двухплечевых инверторов представляется значительно более очевидной в сравнении с трехплечевой, как показано на рис. 4. В представленной конфигурации разрешенными оказываются два состояния ключей, в которых возможно раздельное существование тока по обмотке каждой фазы индуктора.

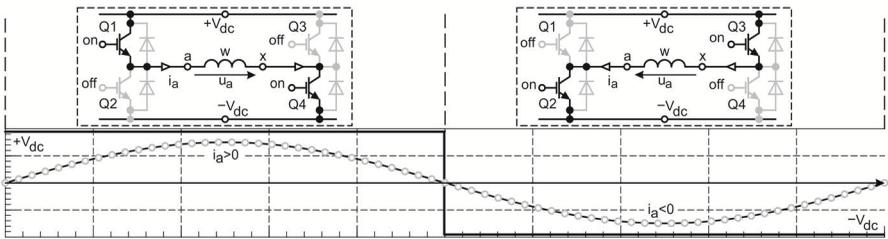


Рис. 4. Переключение состояний мостового звена инвертора

Алгоритм коммутации ключей должен учитывать текущее время и мгновенные токи обмоток, которые в идеализированном случае сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ . Пример временных диаграмм мгновенных токов с разделением на четыре четверти фазового угла  $2\pi$ , соответствующего полному обороту на символической плоскости показан на рис. 5. Ток фазы А зафиксирован с нулевым фазовым углом, а для фазы В угол задан значением  $90$  эл. градусов. В каждой четверти показаны эквивалентная схема обмоток ИМ с указанием магнитных связей для разомкнутого сердечника.

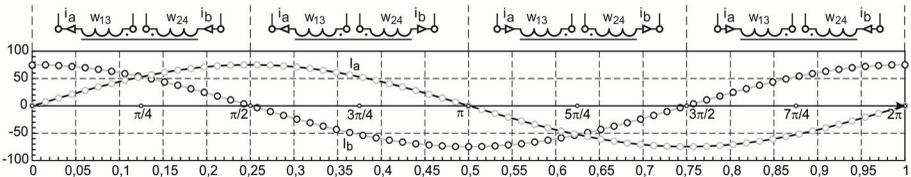


Рис. 5. Диаграммы мгновенных токов в фазах индукционной машины на периоде

При инверсии фазы любого из токов на каждой схеме (рис. 5) показано соответствующее изменение направления, требующее учета при создании стратегии управления ключами [10, 14, 16]. Алгоритм управления в рассматриваемом случае оказывается весьма жестким по сравнению с вариантом питания двухфазной нагрузки от трехфазного трехплечевое силового звена [6]. Нужно заметить, что конфигурация двухфазной силовой схемы при наличии гальванических связей оказывается неуравновешенной, что приводит к разработке мер противодействия симметричным составляющим обратной последовательности [2, 5]. В конструкции четырехзонного индуктора предусмотрена дополнительная обмотка  $W_4$ , в которой за счет инверсии поля исходного тока создается намагничивающая сила  $F_\gamma$ , уравновешивающая базовую систему векторов в фазовом пространстве, как показано на рис. 6.

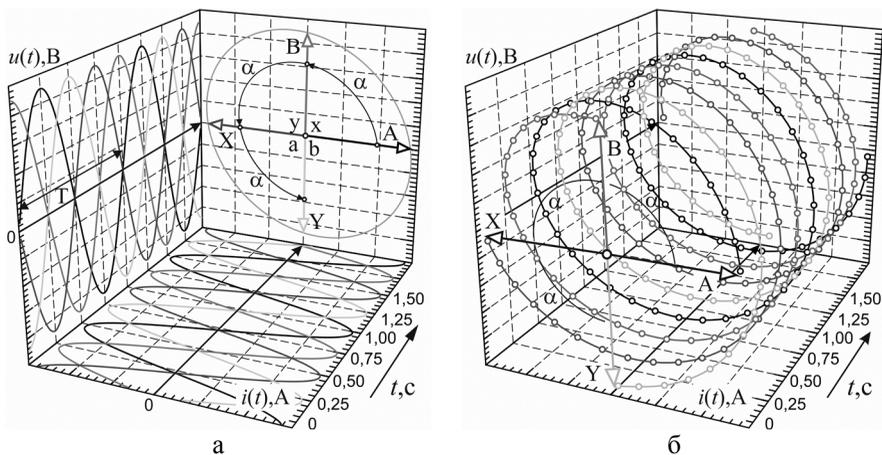


Рис. 6. Фазовые характеристики МДС обмоток МГД-машины

Предложенное гальваническое разделение фаз позволяет избежать негативных последствий в виде искажения системы напряжений источника питания. Конструктивные мере согласования магнитного включения обмоток четырехзонного индуктора позволяют получить уравновешенную систему МДС. Подобным решением удастся сбалансировать электромагнитный режим и понизить уровень вибраций на частоте около 1 Гц.

**Заключение.** Предложенная структура транзисторного инвертора для двухфазной металлургической МГД-машины позволяет реализовать уравновешенную электромагнитную систему, пригодную для технологии электромагнитного перемешивания расплава алюминия. Применение двухплечевых мостовых модулей обеспечивает раздельное управление режимом фаз, что служит определяющим фактором для симметрирования поля индуктора с разомкнутым магнитопроводом и повышения тяговой эффективности МГД-машины. Выбор наиболее простой стратегии управления ключами и разомкнутая структура контура управления инвертора обеспечивают невысокую стоимость и надлежащую надежность работы оборудования. Результирующую оценку сравнительной эффективности Инвертора для двухфазной и трехфазной конфигураций индуктора выполняют по результатам математического моделирования электромагнитного поля для обоих решений с учетом гидродинамики расплава алюминия.

#### Список литературы

1. *Туяпин А.А., Кивев Е.С.* Flat two-phase linear induction MHD machine for metallurgical purposes. American Scientific Journal. New York, USA. 2019, No 27. Vol.1, pp. 61-67.

2. *Tyapin A., Kinev E.* The magnetic field of a multi-phase induction device with switching windings from a triangle to a star. Norwegian Journal of development of the International Science. Oslo, 2019, No 29. Vol. 1. pp. 45 – 52. ISSN 3453-9875.

3. *Кинев, Е.С.* Схемотехника подключения IGBT-инвертора к многофазной индукционной машине / Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. (Брянск, 24-25 октября 2018 г.). – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 208-215. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e61d557532.76134464.

4. *Tyapin A.A., Kinev E.S.* Four-zone linear induction machine with two-phase power. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Vienna, 2019, No3-4, pp. 38-44. ISSN 2310-5607.

5. *Тяпин, А.А.* Частотные характеристики укороченных трехфазных индукционных МГД-машин / А.А. Тяпин, Е.А. Головенко, Е.С. Кинев // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сб. науч. ст. по итогам шестой международной научной конференции (Казань, 31 июля 2019 г.). – Казань, ООО «Конверт», 2019. – Ч.1. – С. 163-171.

6. *Мещеряков, В.Н.* Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов / В. Н. Мещеряков, А.С. Белоусов // Вестник ИГЭУ, 2019. – Вып. 3. – С. 49-61.

7. *Abdel-Rahim N.M.B., Shaltout A.* An unsymmetrical two-phase induction motor drive with slip-frequency control. IEEE Transactions on energy conversion. 2009. V. 24, no. 3. – pp. 608–616.

8. *Jang D. H.* PWM methods for two-phase inverters. IEEE industry Applications magazine. – 2007. – V. 13, no. 2. – pp. 50–61.

9. *Тяпин, А.А.* Двухфазная линейная индукционная МГД-машина трехзонной конструкции / А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. – № 7. – С. 38-48. – ISSN: 2074-9635.

10. *Белоусов, А.С.* Алгоритм управления инвертором двухфазного тока / А.С. Белоусов, А.В. Кокорев, А.А. Муравьев // Современные сложные системы управления. – 2017. – С. 91–96.

11. *Мещеряков В. Н.* Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 2. – С. 13–18.

12. *Shaffer R.* Fundamentals of Power Electronics with MATLAB. Charles River Media, Boston, Massachusetts. USA, 2007, 401 p. ISBN: 1-58450-852-3.

13. *Jang D.H.* Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – V. 28, no. 1. – P. 526–536.

14. *Bose B. K.* Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. Academic Press is an imprint Elsevier Inc. San Diego, California. USA, 2006, 935 p. ISBN: 978-0-12-088405-6.

15. *Wilamowski B. M., Irwin J. D.* The Industrial Electronics Handbook. Power electronics and motor drives. Taylor and Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York. USA, 2011, 974 p.

16. *Williams B. W.* Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components. Glasgow. United Kingdom, 2006, 1432 p. ISBN: 978-0-9553384-0-3.

*Материал поступил в редколлегию 10.10.19.*