



УДК 621.31:66.04

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-26-33

Е. С. КИНЕВ¹

А. А. ТЯПИН^{1,2}

Е. А. ГОЛОВЕНКО²

Ю. С. АВДУЛОВА²

¹ООО «Тепловые электрические системы»,
г. Красноярск

²Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

УПРАВЛЕНИЕ ЛИТЬЁМ АЛЮМИНИЯ ИЗ СТАЦИОНАРНОЙ ПЕЧИ

Рассмотрены особенности работы комбинированного индукционного устройства, предназначенного для транспортирования, перекачивания или перемешивания алюминиевых сплавов с возможностью его подогрева, обеспечивающего расплавление пробок алюминия при старте, а также компенсирующего тепловые потери в ходе литья или перемешивания расплава. Устройство представляет собой одну из разновидностей линейных МГД-машин с сердечником и обмотками, с изменяемым числом пар полюсов, причем последовательность переключения обмоток определяется алгоритмом работы модулей блока управления. В силу разомкнутой конфигурации магнитопровода МГД-индуктора возникает несимметрия магнитодвижущих сил обмоток, что приводит к искажению низкочастотного бегущего магнитного поля. Оценку несимметрии электромагнитного режима укороченных индукторов для разных схем включения обмоток удобно выполнять по векторным диаграммам магнитных потоков. Регулирование тягового усилия индукционного МГД-устройства и интенсивности подогрева выполняют перераспределением линейной токовой нагрузки между фазами индуктора или программированием алгоритмов раздельного управления режимами фаз трехфазного IGBT-инвертора, работающего на пониженных частотах. При правильном выборе схемы соединения обмоток, предложенное устройство обеспечивает непрерывный круговой растр потоков в сердечниках, создавая равномерные тяговые усилия и повышая эффективность электромагнитного воздействия.

Ключевые слова: индуктор продольного магнитного поля, трехфазная индукционная МГД-машина, переключение треугольника в звезду, векторная диаграмма магнитных потоков, бегущее магнитное поле, нелинейная многофазная модель магнитной цепи, несимметрия режима трехфазного частотного инвертора.

Введение. Разработке укороченных индукционных машин посвящено много сравнительно давних [1–5] и новых публикаций [6–12, 5, 13–17], в которых показано, что индукторы поперечного и продольного магнитного поля нашли применение в магнитогидродинамических перемешивателях, насосах, затворах для силового

воздействия на расплав алюминия при его транспортировании из стационарной печи или дозирования. Кроме силового воздействия на расплав индукционные машины обеспечивают тепловое воздействие и могут быть использованы для подогрева алюминия при его перекачивании между ёмкостями.

Обзор технических устройств. Дозирующее устройство для жидкого металла, содержащее керамический металлопровод, расположенный между полюсами индуктора бегущего магнитного поля, предложено в [1]. В этом устройстве заложена возможность расплавления «пробки» застывшего металла в начале литья и ее образование при завершении литья. Такой подход обеспечивает надежное перекрытие металлопровода в перерыве между литьем расплава металла, а также возможность механизации и автоматизации процесса литья. Вместе с тем применением предложенного устройства в ходе литья трудно нормировать выделение в расплавленном металле количества теплоты, которое может оказаться избыточным или недостаточным.

В аналогичном устройстве для перекачивания жидкого металла, предложенном Л. А. Верте [2, 3], расплав приводится в движение с помощью электромагнитных сил бегущего магнитного поля. Бегущее электромагнитное поле наводит в жидком металле индуцированные токи, взаимодействие которых с полем индуктора создает электромагнитные силы, направленные в сторону движения поля. Электромагнитный индуктор создает в расплаве напор, обеспечивающий подъем металла на некоторую высоту для преодоления гидравлического сопротивления перемещению жидкого металла. Одновременно с механическим усилием индуцированные токи вызывают в жидком металле выделение теплоты, которая может использоваться для предотвращения остывания металла. Недостатком такого способа перемещения жидкого металла является то, что выделяемая в жидком металле теплота при создании нужной величины гидравлического напора может оказаться избыточной. Это может приводить к перегреву металла, нарушению технологического процесса приготовления и литья металлов, а следовательно, к снижению качества готовых изделий. Другим риском является недостаток теплоты и застывание металла до начала перемещения или перемешивания [10].

Кроме перечисленных индукционных устройств, известны электрические двигатели, которые имеют две или более частоты вращения. Изменяя схему статорных обмоток, можно изменить число полюсов и получить разные скорости при питании от источника неизменной частоты. Таким образом, изменением направления тока в одной из двух катушечных групп каждой фазы

при переключении обмоток получают удвоенное число полюсов. Подобное регулирование удобно использовать в индукционных машинах.

Постановка задачи. Воздействие электромагнитным полем на расплавы металлов представляется универсальным способом управления литьём. Учитывая простоту и эффективность электромагнитных индукторов продольного магнитного поля необходимо разработать МГД-устройство, пригодное для перекачивания, дозирования и перемешивания расплава алюминия. В создании устройства следует предусмотреть простые средства управления переключением обмоток для наиболее распространенных схем включения в треугольник или звезду. В системе электропитания индукционного устройства применить трёхфазный частотный IGBT-инвертор, способный устойчиво работать на краю частотного диапазона, при высокой несимметрии токов по фазам.

Решение. Рассмотренные выше технические устройства дают возможность регулирования электромагнитного напора, развиваемого электромагнитным насосом, построенным на базе индуктора продольного магнитного поля [15]. Эффект управления литьём можно получить путем переключения соединения «двойная звезда» — «одинарный треугольник» или «двойная звезда» — «одинарная звезда». Регулирование режима достигается применением комбинированной схемы включения обмоток с управляемыми ключами и применением трехфазного частотного преобразователя [4]. Поскольку предлагаемые индукционные устройства воздействуют на цветные металлы, для увеличения глубины проникновения электромагнитной волны с помощью трёхфазных инверторов в обмотках создают токи низкой частоты. Фиксированные значения частоты токов перечисленных устройств существенно различны. Для дозаторов значения частоты выбирают повыше, для электромагнитных лотков частоту тока оптимизируют в диапазоне 5–15 Гц, для перемешивателей характерен диапазон 0,5–1,5 Гц [5]. Изменением напряжения можно обеспечить управление линейной токовой нагрузкой, меняя электромагнитный напор [8–10]. При этом регулируется и мощность, выделяемая в жидком металле.

Разрез малагабаритного индукционного МГД-устройства, размещенного в стенке печи, показан на рис. 1а. Индуктор 1 для выкачивания

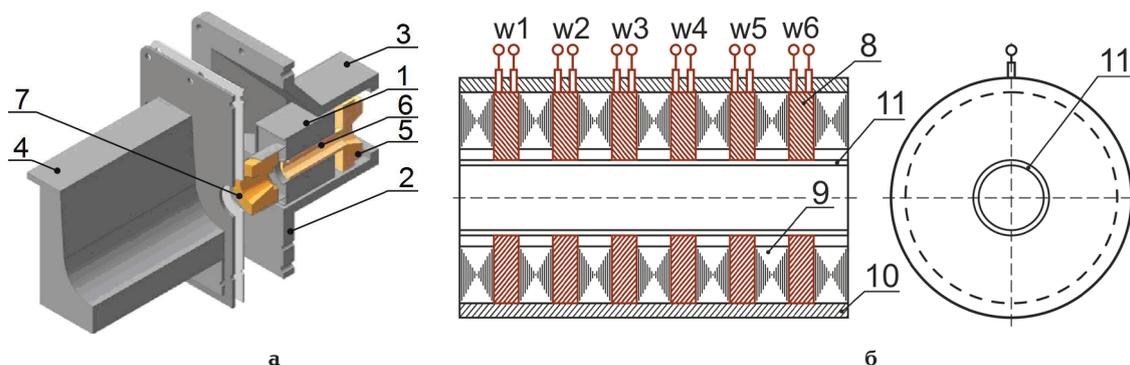


Рис. 1. Разрез малагабаритного МГД-устройства

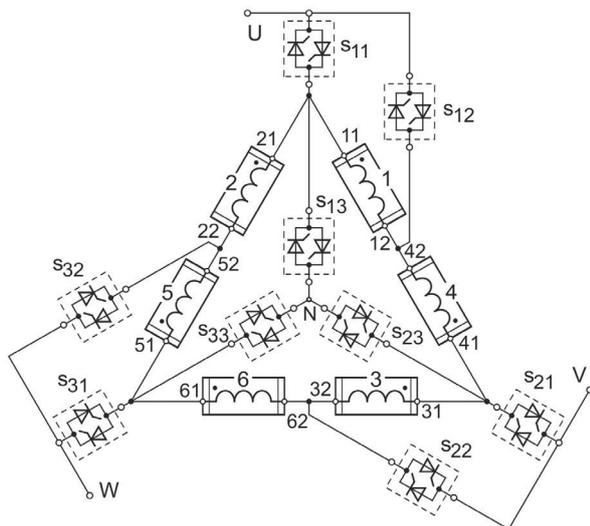


Рис. 2. Схема коммутации ИГД-устройства при соединении треугольником

высокотемпературного расплава из печи установлен в лётное пространство в стенке стационарной печи через фланцы 2 внутри чугунной лётки 3. Встык к лётке размещён участок лотка 4 для транспортировки расплава от печи до литейной машины. Для защиты индуктора от расплава алюминия используется футеровка [11, 12]. Она состоит из заднего лётного камня 5, теплоизоляционной трубки 6 и переднего лётного камня 7. Индуктор ИГД-устройства подключен к многофазному инвертору через блок коммутации (БК).

Работа устройства, реализующего способ управления индукционной ИГД-машиной с жидкометаллическим рабочим телом, происходит следующим образом. Дозируемый расплав перекачивается по теплоизоляционной трубке 6 через канал. Переменный ток регулируемой частоты в обмотках индуктора 1 создаёт в теплоизоляционной трубке 6 бегущее магнитное поле. Наведенные в жидкометаллическом рабочем теле вихревые токи приводят к появлению электромагнитного напора. В зависимости от направления бегущего магнитного поля напор либо противодействует истечению расплава из стационарной печи, или, наоборот, способствует созданию течения. Таким образом, электромагнитное усилие индуктора либо уменьшает скорость течения расплава, либо ускоряет его. Индуктор

1 (рис. 1б), выполнен с обмоткой 8, собранной из шести дисковых секций (шестизонная обмотка) и расположенной между стальными сердечниками 9, закреплёнными внутри трубы 10 магнитопровода. Внутри ИГД-устройства расположена немагнитная стальная разрезная труба 11 канала для прокатки расплавленного металла.

Пример одной из схем включения индукционной машины показан на рис. 2. Индуктор ИГД-устройства имеет шесть катушечных групп $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$ (рис. 1б), которые обозначены цифрами 1÷6 (рис. 2). Модифицированное изображение того же самого устройства показано на рис. 3. Согласно представленной схеме, катушки индукционной машины соединяются в треугольник или в звезду через блок коммутации (БК), реализованный на управляемых ключах $s_{11}, s_{21}, s_{31}, s_{12}, s_{22}, s_{32}, s_{13}, s_{23}, s_{33}$. Катушки электромагнитного индуктора на схеме изображены как элементы, обладающие тепловым воздействием. И в первоначальной (рис. 2), и в модифицированной схеме (рис. 3) реализовано три варианта включения. Схема треугольника (рис. 2) вполне очевидна. Но возможно переключение обмоток этого же индуктора в сдвоенную звезду, а также в одиночную звезду с сокращённым количеством секций. Для коммутации цепей электропитания применяют электронные или электромагнитные ключи. При модифицированном представлении схема соединения треугольником оказывается неявной. Тем не менее функциональное назначение всех элементов схемы сохранено.

Входное напряжение цеховой распределительной сети обозначено буквами А, В, С. По причинам лучшей симметрии использование трёхпроводной схемы соединения силовых цепей предпочтительнее перед четырёхпроводной [12, 14]. Секции индуктора w пронумерованы цифрами в сквозной последовательности 1, 2, 3, 4, 5, 6 и расположены по порядку. Начала всех катушечных групп обозначены буквами $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ и промаркированы точками. Концы секций обмоток обозначены буквами $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$. При необходимости для изменения характера распределения магнитных потоков в порядок чередования контактов можно внести инверсию, выполнив соответствующую коммутацию перемычками. Клеммные контакты для фазных выводов частотного инвертора (регулятора напряжения) обозначены буквами U, V, W и выведена нейтраль.

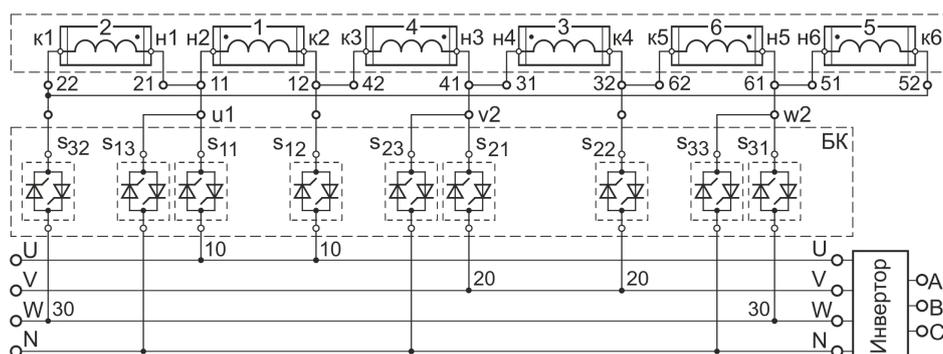


Рис. 3. ИГД-устройство в схеме треугольника на основе блока коммутации

Порядок управления переключением ключей s_{ij} можно представить совокупностью логических состояний, для которых записывают выражения в матричном виде, удобном для программирования цифровых систем управления. Ниже показан общий вид матрицы логических состояний системы управления ключами.

$$[A] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix}$$

Включенное состояние ключа соответствует значению логической единицы, выключенное состояние соответствует логическому нулю. Присваивание логического нуля элементам матрицы приводит к переводу ключа s_{ij} системой управления в отключенное состояние и вносит изменение в технологический процесс. Программирование логических состояний относят к функции микроконтроллерного управления и выполняют на этапе синтеза системы управления технологическим процессом.

В начале литья в стационарной печи уровень расплава максимальный и необходимо противодействовать гидростатическому напору расплава в печи за счет максимального напора [16, 17]. Этот напор обеспечивается для индуктора со следующими параметрами: количество фаз $m=3$, число пар полюсов $2p=4$, число обмоточных групп $Z=6$, количество катушек в фазной зоне $q=1$, фазная зона $\alpha=120$. В схеме соединения треугольником предусмотрена последовательность чередования фаз $UWVUWV$ ($ACBACB$) и полюсный шаг τ_1 , что обеспечивается включением ключей s_{11}, s_{21}, s_{31} блока коммутации (БК) и отключением ключей $s_{12}, s_{22}, s_{32}, s_{13}, s_{23}, s_{33}$. Матрица логических состояний системы управления ключами при этом имеет следующий вид:

$$[\bar{A}_1] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Электрическая схема включения трехфазной индукционной машины с шестью катушечными группами, представленная на рис. 2, как и схема на рис. 3, обеспечивает переключение обмоток

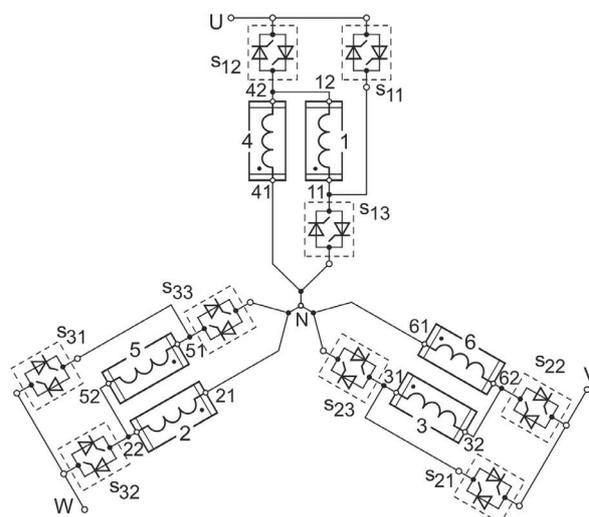


Рис. 4. Схема коммутации МГД-устройства при соединении звездой

из треугольника в двойную звезду при включенных ключах $s_{12}, s_{22}, s_{32}, s_{13}, s_{23}, s_{33}$ и отключении ключей s_{11}, s_{21}, s_{31} БК. Матрица логических состояний системы управления ключами при этом принимает инверсный вид:

$$[\bar{A}_2] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Таким образом, вариант схемы коммутации обмоток индукционного МГД-устройства определяется состоянием электрических ключей.

По мере снижения уровня расплава уменьшается гидростатический напор алюминия. Это требует понижения напора МГД-насоса, который можно ослабить уменьшением напряжения источника питания. При этом снижаются ток в катушках индуктора и линейная токовая нагрузка. Помимо этого, уменьшается тепловая мощность, выделяемая в жидкометаллическом рабочем теле. Ослабление действия бегущего магнитного поля индуктора сопровождается снижением температуры подогрева.

Для поддержания необходимого уровня тепловой мощности в расплаве в определенный

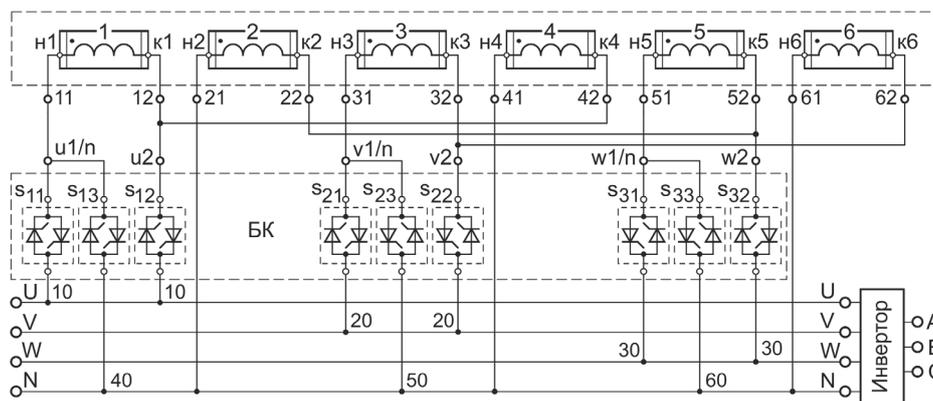


Рис. 5. МГД-устройство в схеме звезды на основе блока коммутации

момент проводится переключение МГД-насоса на схему, которая формирует другие параметры индуктора. Получают следующие параметры: количество фаз $m=3$, число пар полюсов $2p=2$, число обмоточных групп $Z=6$, количество катушек в фазной зоне $q=1$, фазная зона $\alpha=60$. Последовательность чередования фаз $UwVuWv$ ($AzBxCy$) при полюсном шаге τ_2 , обеспечивается включением симисторных ключей $s_{12'}$, $s_{22'}$, $s_{32'}$, $s_{13'}$, $s_{23'}$, $s_{33'}$ БК в звезду и отключенных ключах $s_{11'}$, $s_{21'}$, $s_{31'}$. Для того, чтобы обеспечить необходимый напор, увеличивают линейную токовую нагрузку, что приводит к увеличению напора магнитогиродинамического насоса [18, 19]. Повышение тока сопровождается увеличением выделяемой тепловой мощности в жидкометаллическом рабочем теле, что позволяет подогревать расплав до требуемой температуры.

Другая конфигурация электрической схемы включения трехфазного МГД-устройства с шестью катушечными группами, подключенными к источнику питания через БК, показана на рис. 4. Она обеспечивает переключение обмоток индукционной машины из одинарной звезды в двойную звезду и наоборот. Модифицированное изображение схемы того же самого устройства показано на рис. 5, и при таком представлении схема соединения звездой оказывается неявной. Тем не менее функциональное назначение всех элементов схемы сохранено в полном объеме.

Проверить правильность подключения катушечных групп на рис. 5 можно поэтапным следованием по номерам узлов и топологии присоединения ветвей к узлам.

В зависимости от габарита проектируемого МГД-устройства и требуемой производительности, токи в обмотках индуктора могут изменяться от 50 до 300 ампер. Повышенные токи (и габариты) обмоток характерны для индукционных машин большей производительности при большей глубине проникновения электромагнитной волны [5, 20, 6]. Для больших токов на этапе разработки требуется применить соответствующие технические решения по магнитной системе и оценить возможность размещения увеличенного, например, плоского магнитопровода с зубцами и прямоугольными обмотками из медной шины в конструкциях перемешивателей литейного агрегата [7].

Матрица логических состояний системы управления ключами $s_{ij'}$, используемыми для управления коммутацией обмоток в двойной звезде, для представленной на рис. 5 схемы имеет следующий вид:

$$[\bar{B}_1] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Включенное состояние ключей $s_{12'}$, $s_{22'}$, $s_{32'}$, $s_{13'}$, $s_{23'}$, $s_{33'}$ обеспечивает соединение обмоток в двойную звезду. При этом ключи $s_{11'}$, $s_{21'}$, $s_{31'}$ должны быть отключены. Если при этом в отключенное состояние перевести ключи $s_{13'}$, $s_{23'}$, $s_{33'}$, то схема примет вид одинарной звезды при заблокированном состоянии обмоточных секций 1, 3 и 5 и резко

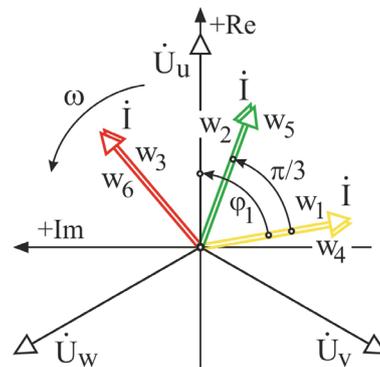


Рис. 6. Векторная диаграмма токов шестизонного индуктора

уменьшенных тяговых свойствах. Матрица логических состояний системы управления ключами в одинарной звезде при этом принимает усеченный вид:

$$[\bar{B}_2] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Подобное включение может оказаться предпочтительным для выполнения запорного назначения при инверсном включении обмоток. Достоинства и недостатки каждой схемы можно оценить по совокупности тяговых характеристик индуктора и технологических особенностей управления режимом электропитания обмоток. Предпочтительно выполнить такое исследование на этапе предварительного анализа с применением средств математического моделирования, например, Comsol Multiphysics.

В силу характера схмотехники индукционной машины в матрице логических состояний системы управления есть и запрещенные комбинации, чреватые переводом ключей в положение, соответствующее короткому замыканию в системе электропитания. Для исключения аварийных ситуаций нужно ограничивать полномочия системы управления. Средствами предотвращения аварий являются схмотехнические ограничения, исключающие одновременное включенное состояние двух ключей на пути сквозного тока между фазой и нулевым проводом.

Пример запрещенного состояния матрицы управления показан ниже:

$$[Z] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Идеализированная векторная диаграмма напряжений и токов шестизонного МГД-устройства с параметрами $m=3$, $2p=4$, $Z=6$, $q=1$, $\alpha=\pi/3$ и последовательностью чередования фаз $AUCAUC$ показана на рис. 6. Фазовый сдвиг ϕ_1 тока первой катушки w_1 принят индуктивным, для характерных, крайне низких значений коэффициента мощности индукционной машины. Векторы катушек w_1 , w_3 , w_4 , w_6 получают прямым включени-

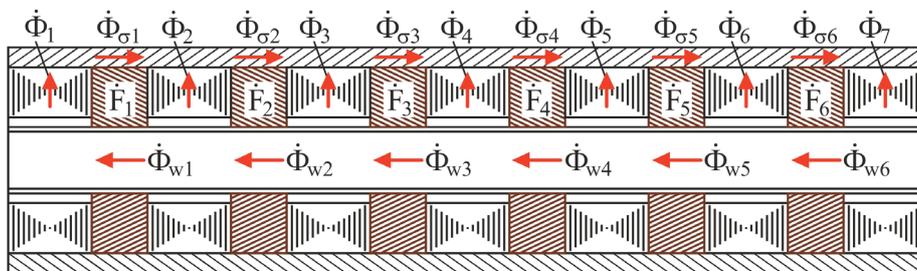


Рис. 7. Модель распределения потоков шестипольного индуктора

ем катушечных групп. Векторы w_2, w_5 получают инверсией включения соответствующей обмотки. По векторным диаграммам можно получить общее представление о распределении магнитных полюсов и характере чередования фаз в обмотках индукционной машины. Вместе с тем в реальном устройстве схема коммутации шести обмоток 8, расположенных между сердечниками 9 (рис. 1б), может быть другой. Её конфигурация определяется характером распределения магнитных потоков и получаемым при этом соотношением составляющих бегущего и пульсирующего магнитного поля в индукторе.

Ввиду применения разомкнутого магнитного сердечника и наличия краевых эффектов реальная картина распределения токов и магнитных потоков в индукционной машине существенно отличается от идеализированной симметричной. Для оценки распределения магнитных потоков необходимо создать и проанализировать математическую модель в виде системы уравнений магнитного равновесия. Вместе с тем анализ такой системы уравнений крайне затруднителен, поскольку кроме краевых эффектов следует учитывать взаимную индуктивность обмоток при конечных значениях магнитной проницаемости ярма (трубы) и зубцов (сердечников) индуктора [7, 13]. Насыщение стали, в свою очередь, зависит от токов в обмотках и изменяется в широких пределах. Численным моделированием установлено, что в особо нагруженном состоянии относительная магнитная проницаемость стали в отдельных участках ярма может снижаться до 20–30 единиц, при соответствующем повышении тепловыделения, влияющем на гидродинамику.

Практика показала, что в таких условиях значительно проще получить результат с применением схемотехнического моделирования режима с учётом перечисленных особенностей. Эскиз симметричной модели для оценки потоков показан на рис. 7. Пример соответствующей схемной модели многофазной магнитной цепи с сосредоточенными параметрами представлен в [7]. В качестве намагничивающих источников в модели применены управляемые источники МДС, режим которых задан эквивалентной синусоидой по набору гармоник, зависящему от степени насыщения стали. Причём эквивалентные векторы МДС обмоток w_2 и w_5 фазы В, для схемы двойная звезда, инвертированы на угол π для получения фазового сдвига $\alpha = \pi/3$, характерного при классическом включении обмоток с инвертированной средней фазой. Комплексы

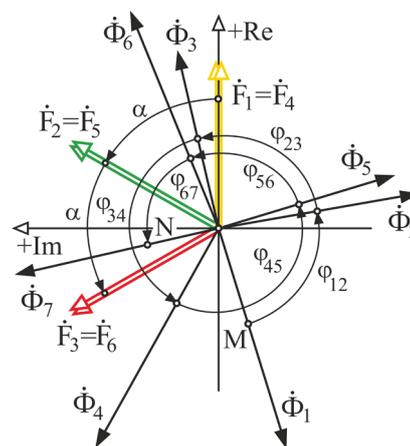


Рис. 8. Векторная диаграмма магнитных потоков сердечников

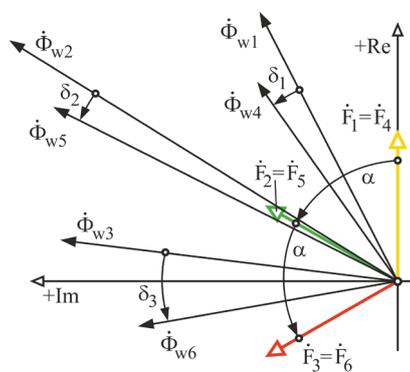


Рис. 9. Распределение магнитных потоков в канале

эквивалентных синусоид МДС фазы W оставлены без изменения, с естественной фазой $+2\pi/3$ в прямой последовательности. Воздушные промежутки и расплав металла в модели представлены неизменными резистивными магнитными сопротивлениями, рассчитанными по реальной геометрии индуктора, предназначенного для малогабаритных насосов при воздушном зазоре 80–150 мм. Участки магнитопровода замещены нелинейными сопротивлениями при табличном описании вебер-амперных характеристик.

Векторная диаграмма магнитных потоков в зубцах индукционной машины, полученная по шестипольной расчетной модели, показана на рис. 8. Распределение магнитных потоков

в ярме представлено на рис. 8. На каждой диаграмме выполнено совмещение потоков с системой МДС обмоток для сопоставления полученных фазовых соотношений.

Полученное распределение потоков в целом подтверждает эффективность выбранной схемы МГД-устройства и его высокие тяговые свойства в такой конфигурации.

В ходе исследования проверено несколько схем коммутации обмоток, причём для равномерного распределения фазовых сдвигов МДС с углом $\pi/3$ расчетные значения магнитных потоков $\Phi_1 - \Phi_7$ оказались существенно меньше, а характер их распределения по окружности оказался менее равномерным, что обуславливает большее влияние составляющих пульсирующего магнитного поля.

Опыт применения различных схем соединения обмоток индукционных машин позволяет рекомендовать наиболее эффективные конфигурации подключения обмоток, среди которых явными преимуществами для малогабаритных изделий, особенно для двойной звезды, обладает схема АУСАУС. В таком соединении легко реализовать традиционное инверсное включение второй фазы, создающее фазовые сдвиги α (рис. 6) для МДС двойной звезды. При этом лучшие результаты и более равномерное распределение потоков зубцов по окружности при меньших значениях компонент пульсирующего магнитного поля даёт условие $F_2 = F_5 \gg F_1 = F_4$ и $F_2 = F_5 \gg F_3 = F_6$. На практике это означает большее число витков в средних обмотках каждой звезды.

Другим способом регулирования равномерности распределения магнитных потоков по окружности является управление режимом частотной инвертора [4, 12], при наличии возможностей автономного управления фазовыми сдвигами токов в обмотках. Судя по векторной диаграмме, именно увеличение токов средних секций индуктора (или числа витков) влияет на динамику фазовых соотношений потоков в сердечниках (зубцах) индукционной МГД-машины. Анализ изменения фазовых сдвигов магнитных потоков $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7$ по диаграмме (рис. 8) удобно начинать, стартуя из точки М, против часовой стрелки. Складывая фазовые сдвиги $\Phi_{1-2}, \Phi_{2-3}, \Phi_{3-4}, \Phi_{4-5}, \Phi_{5-6}, \Phi_{6-7}$ за два неполных витка, легко подтвердить, что суммарный угол охвата расплава в канале приближается к 700 электрическим градусам.

Распределение магнитного поля в самом канале, непосредственно в области индуктирующих катушек, можно проанализировать по другой векторной диаграмме (рис. 9). Векторы Φ_{w1} и $\Phi_{w4'}$, Φ_{w2} и $\Phi_{w5'}$, Φ_{w3} и Φ_{w6} оказались сгруппированными попарно, по причине одинаковых намагничивающих сил одноимённых обмоток и значительно больше по величине. При этом сдвиг фаз δ между близко расположенными одноимёнными векторами неодинаков. Кроме того, векторы для магнитных потоков в крайних индуктирующих катушках сдвинуты ближе к центру по причине наличия краевых эффектов. Расчет показал более чем трёхкратное превышение интенсивности магнитного поля каждой катушки в канале, а учитывая близкое расположе-

ние смежных векторов, повышение оказывается почти шестикратным.

Результаты расчета токов и магнитных потоков в сердечниках (рис. 8) для установившегося режима многофазной нелинейной магнитной цепи с сосредоточенными параметрами показывают, что двойная звезда обеспечивает совокупность фазовых сдвигов, характерную для четырёхполюсной индукционной машины $2p=4$. Хотя, судя по диаграмме, по причине наличия в укороченной машине краевых эффектов, оказалось, что сумма фазовых сдвигов магнитных потоков зубцов несколько меньше 4π .

Заключение. Предложенные МГД-устройства могут быть использованы при создании технологий электромагнитного воздействия на расплав алюминия. Применение управляемого блока коммутации обеспечивает переключение обмоток индукторов, с изменением тяговых характеристик, обусловленных изменением полюсности. Переключение треугольника в звезду или переключение звезды создают необходимую схему, пригодную для гибкого управления перекачиванием, дозированием или перемешиванием расплава.

Исследование показало, что правильный выбор схемы соединения и инверсия фаз позволяют обеспечивать непрерывный круговой растр потоков в сердечниках. Во внешнем магнитопроводе поле характеризуется суммой потоков сердечников и становится полем рассеяния. При любом распределении магнитных потоков по сердечникам интенсивность магнитного поля в канале выше, нежели в сердечниках, создавая требуемые тяговые усилия в расплаве. Это можно считать достоинством предложенных МГД-машин, поскольку магнитная индукция потоков рассеяния в стали не достигает экстремальных значений и не вызывает преждевременного насыщения.

Библиографический список

1. А. с. 1770047 СССР, МПК В 22 D 39/00, В 22 D 11/10. Дозирующее устройство для жидкого металла / Семеничев Ю. Н., Возмилов В. М. № 4757062; заявл. 09.11.89; опубл. 23.10.92.
2. А. с. 113696 СССР, МПК В 22 D 27/02, В 22 D 37/00, В 22 D 39/00. Способ перемещения жидкого металла / Верте Л. А. № 364120; заявл. 02.02.48; опубл. 01.01.58.
3. А. с. 113697 СССР, МПК В 22 D 39/00, В 22 D 27/02. Способ дозирования жидкого металла / Верте Л. А. № 364120; заявл. 02.02.48; опубл. 01.01.58.
4. Круминь Ю. К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. Рига: Зинатне, 1983. 278 с.
5. Баранов Г. А., Глухих В. А., Кириллов И. Р. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкоталлическим рабочим телом. М.: Атомиздат, 1978. 248 с.
6. Pavlov E., Ivanov D., Gassanov P., Gulayev A. Method and apparatus for moving molten metal. US patent 9901978B2; filed March 28th, 2014; published February 27th, 2018.
7. Tyapin A. A. Inductors for electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal. 2018. No. 19, Vol. 1. P. 64–67.
8. Kim H. R., Lee Y. B. A design and characteristic experiment of the small annular linear induction electromagnetic pump // Annals of Nuclear Energy. 2011. Vol. 38, Issue 5. P. 1046–1052. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.01.008.

9. Kuijpers A. A., Nemlioglu C., Sahin F. [et al.]. Force Analysis of Linear Induction Motor for Magnetic Levitation System // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010, Sept. 6–8, 2010. Macedonia, 2010. P. 17–20. ISBN 978-1-4244-7856-9.
10. Тяпин А. А. The structure of electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal. 2018. No. 20, Vol. 1. P. 50–57.
11. Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni M. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, Issue 2. P. 306–314. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.016.
12. Chen X.-R., Zhang Z.-F., Xu J. Effects of annular electromagnetic stirring processing parameters on semi-solid slurry production // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010. Vol. 20, Suppl. 3. P. s873–s877. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60598-5.
13. Hamzeshbahmani H. Modeling and simulating of single side short stator linear induction motor with the end effect // Journal of Electrical Engineering. 2011. Vol. 62, no. 5. P. 302–308. DOI: 10.2478/v10187-011-0048-5.
14. Gerzek A. S., Karlı V. M. Performance Prediction of the Single-Sided Linear Induction Motors for Transportation Considers Longitudinal End Effect by Using Analytic Method // Contemporary Engineering Sciences. 2009. Vol. 2, no. 2. P. 95–104.
15. Pucci M. Direct field oriented control of linear induction motors // Electric Power Systems Research. 2012. Vol. 89. P. 11–22. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.01.012.
16. Кинев Е. С., Тяпин А. А., Ефимов С. Н. Оценка несимметрии индукционной машины с применением метода симметричных составляющих // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 6. С. 68–79.
17. Bazghaleh A. Z., Naghashan M. R., Mahmoudimanesh H. [et al.]. Effective Design Parameters on the End Effect in Single-Sided Linear Induction Motors // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2010. Vol. 4, no. 4. P. 701–706.
18. Чаплыгин Е. Е. Несимметричные режимы трехфазного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности // Электричество. 2005. № 9. С. 55–62.
19. Тяпин А. А., Андрющенко В. Ю., Горемыкин В. А. [и др.]. Оценка глубины проникновения электромагнитной волны в расплавленный алюминий // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение. 2018. С. 27–34. ISBN 978-5-907135-01-7.
20. Головенко Е. А., Горемыкин В. А., Кинев Е. С. [и др.]. Технология электромагнитного воздействия на расплав алюминия в миксерах и печах // Цветные металлы. 2014. № 2 (854). С. 86–92.

КИНЕВ Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, директор ООО «Тепловые электрические системы».

SPIN-код: 9360-9781

AuthorID (РИНЦ): 995850

Адрес для переписки: Kinev_ES@ontecom.com

ТЯПИН Алексей Андреевич, инженер-исследователь ООО «ТЭС», аспирант кафедры «Электротехнология и электротехника» Сибирского федерального университета (СФУ).

Адрес для переписки: ceo@tamerlan-krk.ru

ГОЛОВЕНКО Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнология и электротехника» СФУ.

SPIN-код: 1204-2780

AuthorID (РИНЦ): 299307

Адрес для переписки: Golovenko_EA@mail.ru

АВДУЛОВА Юлия Сергеевна, ассистент кафедры «Электротехнология и электротехника» СФУ.

SPIN-код: 9751-8790

AuthorID (РИНЦ): 1000265

Адрес для переписки: avdulova_ys@mail.ru

Для цитирования

Кинев Е. С., Тяпин А. А., Головенко Е. А., Авдулова Ю. С. Управление литьём алюминия из стационарной печи // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 26–33. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-26-33.

Статья поступила в редакцию 17.12.2018 г.

© Е. С. Кинев, А. А. Тяпин, Е. А. Головенко, Ю. С. Авдулова