

6
A-40

ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
АКАДЕМИИ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

Т. К. КАЛНИНЬ

ЯВНОПОЛЮСНЫЕ МГД-МАШИНЫ
С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ
РАБОЧИМ ТЕЛОМ

(05.230 — Электрические машины)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

РИГА 1971

ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
АКАДЕМИИ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

Т. К. КАЛНИНЬ

ЯВНОПОЛЮСНЫЕ МГД-МАШИНЫ
С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ
РАБОЧИМ ТЕЛОМ

(05.230 — Электрические машины)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

РИГА 1971

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная гидродинамика (МГД) как самостоятельная отрасль науки оформилась примерно 30 лет тому назад. Уже к этому времени стало ясно, какие новые принципиальные возможности сулит использование электромагнитных сил в различных технологических процессах, и был предложен целый ряд конкретных МГД-устройств (насосов, перемешивателей и т. д.). Возможности эти обусловлены рядом специфических свойств МГД-воздействия: дистанционное возбуждение сил, относительно свободная их ориентация в пространстве, управляемость процессом путем регулировки электрических параметров. Последнее обстоятельство существенно с точки зрения автоматизации процесса. Для сравнения отметим, что в настоящее время например, в металлургии непрерывное перемещение жидкого металла практически может быть достигнуто путем использования ограниченного числа явлений, обусловленных действием силы тяжести (самоток, конвекция, аэролифты и т. д.).

С помощью МГД-устройств принципиально возможно осуществить транспорт жидкого металла из одной емкости в другую по закрытым трубопроводам или открытым лоткам, непрерывное или порционное дозирование металла, его перемешивание с целью улучшения структуры или ускорения химических реакций, сепарацию твердых и газообразных компонентов в технических процессах, регулирование истечением, управление струей жидкого металла и т. д.

Однако эти возможности использования МГД-устройств до настоящего времени были реализованы только частично, причем в основном для работы с жидкими металлами при температурах не выше 500°C .

Хорошим примером комплексного применения низкотемпературных МГД-устройств является разработанный в СКБ

МГД Института физики АН Латвийской ССР процесс и аппаратура изготовления ртути высших марок. Этот процесс осуществлен на Никитовском ртутном комбинате. На этой же основе строится комбинат «Исмаил» в Алжире.

Многочисленные попытки применения подобных конструкций для работы в высокотемпературных условиях не привели к существенным успехам. Это свидетельствует о том, что принципы проектирования высокотемпературных МГД-устройств должны быть пересмотрены. Качество такой машины, как правило, определяется не столько коэффициентом полезного действия и весом, сколько такими показателями, как ресурс работы, надежность, удобство эксплуатации и ремонта и т. д. Общая тенденция при этом ясна: конструкции устройств должны быть целеустремленно упрощены, даже в ущерб энергетическим показателям.

Любое МГД-устройство состоит из двух принципиальных частей: канала и индуктора. На пути упрощения формы канала достигнуты существенные результаты. Например, до цеха уже доведены такие устройства, как электромагнитный лоток и цилиндрический насос без сердечника*. В первом случае каналом устройства служит простой открытый желоб, во втором случае — просто круглая труба. Но важно отметить, что индукторы указанных устройств имели «классическое» исполнение: — продольная шихтовка, многослойная, уложенная в пазах обмотка.

Основная задача настоящей работы заключается в поиске возможностей существенного упрощения второго компонента машины — индуктора. Есть все основания ожидать, что в этом направлении может быть достигнут не менее важный результат в деле создания действительно работоспособных высокотемпературных МГД-устройств. Здесь имеется ряд возможностей. Например, предложены разные схемы упрощения самой обмотки**. Идея упрощения индуктора реализуется так

* 1. A. Starck, S. Husmann. Der Einsatz von elektromagnetischen Förder- und Dosiereinrichtungen für flüssige Metalle. AEG — Eloterm, Sonderdruck Klepzig Fachberichte, Heft 1 / Januar, 1971.

2. А. К. Везе, М. С. Лукин, А. Э. Микельсон, В. Д. Мищенко. Электромагнитный насос с односторонним индуктором для алюминия. Технология легких сплавов, ВИЛС, 1971, № 1, 122.

** А. И. Вольдек, Л. Х. Ранну, Х. И. Янес. О некоторых новых направлениях в разработке специальных обмоток для устройств с бегущим магнитным полем. Магнитная гидродинамика, 1966, № 2, 135.

же в некоторых видах МГД-дозаторов***. Но здесь следует отметить, что в последнем случае упрощение индуктора идет за счет значительного усложнения канала. Ведущей идеей в настоящей работе является переход к явнополюсному выполнению индуктора. Явнополюсные схемы в принципе дают возможность как для упрощения обмотки, так и магнитопровода. Открываются также новые возможности в проблеме уменьшения электрического напряжения, подводимого к зоне с жидким металлом. Вопрос этот имеет иногда решающее значение при определении действительной работоспособности высокотемпературных устройств. Вместе с тем с помощью индукторов в каналах простейшей формы можно организовать бегущее магнитное поле, т. е. реализовать, наверное, наиболее эффективную для высокотемпературных условий трансформацию электрической энергии в гидравлическую. Ввиду практически полного отсутствия работ по этому вопросу, основное внимание уделено разработке научных основ проектирования подобных машин.

РАЗДЕЛ I

МГД-МАШИНЫ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПОЛЮСАМИ

Глава I

Основные конструктивные схемы

В первой главе настоящей работы дается обзор существующих конструкций явнополюсных МГД-машин. Разнообразие жидких металлов, широкий диапазон рабочих температур и гидравлических параметров — напора и производительности, а также большое различие условий эксплуатации предъявляют к конструкциям МГД-машин в каждом конкретном случае свои специфические требования. Все это и является той основной причиной, по которой до сих пор не были разработаны серийные стандартные насосы и генераторы.

В конструкциях МГД-машин используются отдельные элементы электрических машин (асинхронных двигателей, электромагнитных муфт, машин с дуговым статором и т. п.)

*** Н. Р. Аронова, В. И. Дубобелов, А. С. Зенкин, В. П. Полищук, М. Р. Цин. Электромагнитный транспорт жидкого металла в литейных цехах магниевого литья. Магнитная гидродинамика, 1967, 4, 153.

и механических насосов жидких сред (канал), но в связи с агрессивностью расплавленных металлов и их высокими температурами для МГД-машин необходимо свое оригинальное решение.

Анализ многочисленных действующих и предлагаемых конструкций явнополюсных МГД-машин дает возможность провести их условную классификацию. На основе этой классификации выделяются следующие основные конструктивные разновидности явнополюсных МГД-машин: машины со спиральным каналом, со спиральным ротором, центробежные и машины с разделенным магнитопроводом. Область применения каждой конкретной конструкции определяется по ее производительности и напору.

Можно подчеркнуть, что применение постоянных магнитов в значительной мере упрощает конструкцию и устраняет джоулевы потери возбуждения. С развитием техники изготовления высококачественных постоянных магнитов с энергией порядка 10^7 э.э. и температурно стабильных до 550°C становится возможным создание конструкций на постоянных магнитах, работоспособных при более высоких температурах, чем системы с токовым возбуждением. Эксплуатация МГД-машин с постоянными магнитами показала, что они сохраняют стабильные характеристики при длительной эксплуатации. Недостатком таких машин пока является то обстоятельство, что магниты с большими значениями энергии могут быть изготовлены лишь небольших размеров (по весу порядка нескольких килограмм) и несложной геометрической формы (цилиндры, призмы).

Наиболее распространенным видом конструкции явнополюсных машин с движущимися полюсами являются насосы со спиральным (винтовым) каналом. Конструкция канала обеспечивает необходимую жесткость и легкое внутреннее размещение ротора. Такие конструкции позволяют достичь больших значений напора при небольших производительностях. Они применяются, в основном, для щелочных металлов.

При больших производительностях более перспективными являются насосы со спиральным ротором и центробежные. Насосы со спиральным ротором предпочтительны в случаях, когда в распоряжении имеется привод с большими оборотами. Тогда с изменением угла подъема спирали (винта) оказывается возможным подобрать аксиальную составляющую скорости поля, соответствующую оптимальному значению

скольжения и, таким образом, существенно повысить к. п. д. машины.

Для маломощных машин с постоянным магнитом экспериментально полученные значения к. п. д. при больших оборотах привода подтверждают их преимущество.

Экспериментальная проверка конструкции явнополюсных насосов центробежного типа с постоянными магнитами выявила их длительную работоспособность, несмотря на сложность гидравлической картины внутри канала типа улитки. Самые лучшие характеристики получаются при отсутствии внутри канала каких-либо направляющих, но это конструктивно осложняет механическое крепление канала.

Обзор и систематизация материала по конструкциям явнополюсных МГД-машин и их классификация позволили установить особенности их проектирования, изготовления, а также оценить области применения.

Глава II

Теория электромагнитных явлений в МГД-машинах с вращающимися полюсами

Определение характеристик МГД-машин расчетным путем является сложной задачей, т. к. точность определения тепловых и гидравлических величин невелика ($\pm 15\%$). Поэтому при создании основ теории и методики расчета нецелесообразно опираться на решение сложных электродинамических задач. При разработке теории неявнополюсных МГД-машин, предназначенных в основном для энергетики, многими авторами потрачено много времени на решение сложных задач, очень приблизительно описывающих явления, протекающие в канале (принималось, что имеется плоский профиль скорости по сечению). Одновременно многие практические вопросы совсем не решались или решались поверхностно.

В основу методики расчета явнополюсных МГД-машин нами выдвигаются сравнительно простые предположения, учитывающие как явнополюсность, так и тип возбуждения. При таких предположениях электродинамические задачи получаются сравнительно простыми, и их решение дает возможность сравнить характеристики явнополюсных МГД-машин различных конструкций, а также сравнить их с характеристиками неявнополюсных МГД-машин.

В основе расчетов электромагнитных характеристик явнополюсной МГД-машины лежит предположение, что имеются две симметричные оси: d — продольная и q — поперечная, и в направлении каждой оси имеется свое магнитное сопротивление. Магнитное поле представляется в виде $B = B_d + iB_q$, $B_d = k_1 \mu_0 H_d$ и $B_q = k_2 \mu_0 H_q$; $k_1 = R_{mb}/R_{md}$; $k_2 = R_{mb}/R_{mq}$; R_{mb} — магнитное сопротивление слоя жидкого металла (на один полюс τ); R_{md} (R_{mq}) магнитное сопротивление по всей продольной (поперечной) оси. При определении коэффициентов k_1 , k_2 используются уравнения Максвелла в интегральной форме. При определении же таких характеристик, как магнитное поле в рабочем режиме, токи в жидком металле и электромагнитный напор используется дифференциальная форма этих уравнений. При расчетах принимается, что рабочая точка постоянного магнита находится на кривой возврата, что и имеет место в действительности, так что магнитную проницаемость можно считать постоянной.

Сопоставляется расчет магнитных полей, тока и электромагнитного напора неявнополюсной и явнополюсной машин. На простом примере показано различие в определении характеристик обоих типов машин.

Для нахождения более точных значений отдельных электродинамических параметров используются более сложные расчетные модели явнополюсной МГД-машины.

В результате решения ряда задач с использованием таких моделей устанавливаются основные факторы, влияющие на электромагнитный напор. При постоянстве индукции на поверхностях полюсов значительную роль здесь играет величина рабочего зазора. По мере увеличения его зазора увеличиваются и потоки рассеяния, а также неравномерность индукции по высоте зазора. Приводятся выражения и графические зависимости, показывающие увеличение коэффициента рассеяния от числа полюсов при постоянном диаметре машины.

Значительное влияние на характеристики оказывает магнитная проницаемость постоянного магнита. При $\mu \rightarrow \mu_0$, благодаря увеличению магнитного сопротивления, уменьшается размагничивающее действие токов, индуцированных в жидком металле, что приводит к росту электромагнитного напора. Установлено, что постоянные магниты влияют также на магнитное число Рейнольдса $\epsilon_q = \epsilon k_q$. Полученные расчетные выражения позволяют сравнить характеристики неявно-

полюсных и явнополюсных машин, а также явнополюсных с токовым возбуждением и с постоянными магнитами. В результате решения и анализа одной задачи, вытекающей из обобщенной идеализированной модели, выясняется роль высших гармоник магнитного поля. Их вклад при определении электромагнитного напора становится заметным при значении $\epsilon_q > 0,5$. Определено их влияние на напор при различных значениях ширины полюса b_p .

На основе анализа решений нескольких отдельных задач оказалось возможным выяснить и определить основные величины, влияющие на электромагнитные характеристики явнополюсных МГД-машин с движущимися полюсами. К их числу относятся геометрические величины: R — радиус ротора; δ — рабочий зазор, отношение b_p/τ ; число полюсов $2p_n$; μ — магнитная проницаемость индуктора и параметр ϵ_q . Однако полученные выражения являются сложными и для инженерного расчета они мало пригодны. Кроме того, они не учитывают влияние концевых эффектов на электромагнитный напор и джоулевы потери.

Так как учет концевых (краевых) эффектов значительно усложняет решение электродинамических задач, то одновременное определение коэффициентов всех трех краевых эффектов: толщинного k_b , продольного k_l и поперечного k_a на напор не удастся. Удачно выбранные условия задачи при определении роли толщины и ширины слоя жидкого металла дали возможность получить сравнительно простые выражения для коэффициентов толщинного и поперечного краевых эффектов. Приводятся кривые коэффициента толщинного краевого эффекта в зависимости от магнитного числа Рейнольдса и параметров магнитной системы машины.

Теоретический анализ показывает, что для ртути, щелочных и черных металлов влияние толщины слоя на электромагнитный напор и джоулевы потери невелико по сравнению с идеальной машиной. Более существенным для электродинамических характеристик явнополюсной МГД-машины является поперечный краевой эффект. Приводятся выражения для коэффициента поперечного краевого эффекта k_{oc} (коэффициента ослабления напора) и расчетные кривые для различных магнитных чисел Рейнольдса, относительной ширины канала и параметров магнитной системы машины.

Электромагнитный напор представляется в виде $p_e = p_o k_a k_b k_l$, где p_o — напор без учета краевых эффектов; k_l — коэффи-

циент продольного краевого эффекта, учитывающий конечные размеры индуктора в направлении перемещения жидкого металла. Выражение для k_l дано в пятой главе.

В результате теоретического исследования явнополюсных МГД-машин с вращающимися полюсами были получены выражения для определения основных электромагнитных характеристик: токов и магнитных полей в жидком металле, электромагнитного напора, джоулевых и других потерь, которые используются при расчете и конструировании реальных машин.

Глава III

Гидравлические характеристики и коэффициент полезного действия

Настоящая глава посвящена анализу результатов экспериментального исследования моделей и действующих насосов. При этом проверяются основные положения расчета электромагнитного напора для наиболее распространенных типов МГД-насосов — со звездообразными и когтеобразными роторами — на имитаторах жидкого металла — цилиндрах из твердого металла. Приводятся также результаты исследования явнополюсных насосов на жидкометаллических контурах. Одна часть экспериментального материала служит подтверждением правильности упрощений, принятых при разработке методики расчета МГД-насосов, а другая — качественным обоснованием эффектов, которые всегда следует учитывать при проектировании МГД-машин. К числу таких эффектов нужно отнести, например, влияние высших гармоник на течение жидкого металла в бегущем и пульсирующем магнитных полях, шунтирующее действие электропроводящих стенок канала и некоторые другие, количественные характеристики которых найти пока затруднительно.

Экспериментальная проверка распределения магнитного поля в рабочем зазоре показывает, что выражения, полученные в предыдущей главе при решении соответствующих задач, вполне пригодны для расчета магнитного поля. При определении магнитных потоков рассеяния могут быть также использованы выражения, применяемые при расчете обычных и магнитоэлектрических машин. Расхождение расчета и эксперимента не превышает $\pm 10\%$.

Границы применимости выражения для электромагнитного напора, полученные при довольно упрощенных предположениях о магнитных потоках (введение двух осей — продольной и поперечной), определяются экспериментально с помощью имитаторов жидкого металла. Опыты, проведенные для параметров: $a/\tau = 0,22 \div \infty$, где a — полуширина канала, и $\varepsilon_q = 0 \div 3,5$, показывают, что совпадение расчета с опытом наблюдается для всех ширин канала при значениях $\varepsilon_q < 1,5$. При больших значениях расхождение составляет $\approx 15\%$, которое можно уменьшить, используя для расчета более сложное выражение коэффициента ослабления напора k_{oe} . В большинстве случаев в насосах с постоянными магнитами (из-за их небольших мощностей) значение параметра ε_q не превышает 1,5.

Наблюдается совпадение опытных и расчетных электромагнитных характеристик для насосов с различными типами роторов: звездообразных — как с полюсными башмаками, так и без них, когтеобразных и спиральных.

Указывается на то, что существующие экспериментальные методы не дают возможности разделить влияние отдельных факторов на гидравлические характеристики МГД-машин, что в значительной степени ограничивает сравнение расчетных и опытных гидравлических характеристик.

По методу «подвешенного индуктора» определяется электромагнитный напор при различном числе оборотов ротора. С помощью этого метода удается констатировать, что в случае, когда отсутствуют у проводящего канала боковые ток замыкающие шины, наблюдается быстрый спад напора с ростом производительности. Дается объяснение этому явлению, указывая, что уменьшение напора происходит в основном по двум причинам: из-за наличия шунтирующего эффекта проводящих стенок канала и из-за увеличения гидравлического сопротивления канала, обусловленного неоднородностью распределения сил по сечению канала. В настоящее время отсутствуют экспериментальные методы, позволяющие разделить оба эти явления, и поэтому определяется только их суммарное воздействие на гидравлические характеристики.

Указывается на то, что более сложным вопросом является проверка расчетных гидравлических характеристик МГД-машин. С одной стороны, существующие экспериментальные методы дают погрешность не меньше, чем $10 \div 15\%$, в основном из-за неточного определения расхода жидкого металла. Более точно определяется напор ($\pm 5\%$) для щелочных ме-

таллов, ртути, галлия. Определение напора для более агрессивных металлов, например, черных, алюминия, цинка остается еще нерешенным вопросом. В связи с этим, сравнение расчетных и опытных гидравлических характеристик носит весьма условный характер. С другой стороны, при расчете гидравлических характеристик исходят из весьма идеализированных представлений о процессах, происходящих внутри канала. Большие трудности имеют место при оценке роли отдельных факторов, влияющих на гидравлические характеристики. Так, например, при существующей методике определения гидравлических характеристик не удается отделить влияния высших пространственных гармоник на гидравлические потери давления от влияния неоднородного силового поля по ширине канала, а также от шунтирующего действия проводящих стенок канала. Это затрудняет оценку роли шунтирующего эффекта, так как при расчете невозможно задавать сколько-нибудь точные значения контактного сопротивления между жидким металлом и проводящими стенками канала. Начатые в последнее время исследования по течению жидкого металла в неоднородном силовом поле дают возможность определить гидравлические характеристики только при небольших значениях числа Рейнольдса $\epsilon \ll 1$, что также ограничивает оценку этого явления.

В настоящее время сложилось такое положение, что сравнение расчетных и опытных гидравлических характеристик возможно только тогда, когда имеются боковые токозамыкающие шины и шунтирующий эффект слабо выражен. Приводятся опытные гидравлические характеристики явнополюсных МГД-насосов, подтверждающие это. В случаях, когда имеются боковые токозамыкающие шины с достаточно большим сечением или когда ширина канала $a > \tau$, совпадение расчетных и опытных характеристик достаточно хорошее ($\pm 15\%$).

Необходимость повышения коэффициента полезного действия МГД-машин, предназначенных для энергетики, является актуальным вопросом. Анализ опубликованных работ показывает, что авторы часто одновременно требуют как увеличения к. п. д., так и уменьшения веса машины. Такая постановка задачи является противоречивой, так как уменьшение веса означает увеличение удельных нагрузок (плотности тока, скорости жидкого металла и др.), что вызывает увеличение потерь мощности. Правильнее ставить задачу таким образом, чтобы требовать максимума к. п. д. при заданном весе ма-

шины, что и было проведено в настоящей работе. При такой постановке определяется максимальное значение к. п. д. машины с возбуждением постоянными магнитами. В этом случае основными потерями, определяющими к. п. д., являются джоулевы потери в жидком металле и в стенках канала и гидравлические потери в канале. С учетом этих потерь определяется оптимальное значение скольжения s_0 .

Гидравлические потери мощности удобно выразить через число Стюарта N . Показано, что при его росте значение к. п. д. увеличивается и стремится к определенному пределу, который определяется коэффициентом гидравлического сопротивления канала при отсутствии магнитного поля λ_0 . Недостаточная информация о влиянии магнитного поля на коэффициент гидравлического сопротивления не позволяет в настоящее время установить строгую функциональную зависимость $\lambda(N)$. Используя формулу $\lambda = \lambda_0(1 + k_f N)$ и учитывая, что до сих пор в литературе встречаются лишь $k_f \geq 1$, и оценив к. п. д. при $k_f = 1$, являющимся самым лучшим случаем, и отсутствии проводящих стенок канала, можно показать, что при $N \rightarrow \infty$ и $\lambda_0 = 0,015$ $\eta_{max} \approx 82\%$. Это ограничение, накладываемое на к. п. д. мощных МГД-машин из-за наличия гидравлических потерь, является существенным и лишней раз указывает на важность установления правильной зависимости $\lambda(N)$.

На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов разрабатывается методика определения основных размеров насосов по заданным значениям напора и производительности. Методика расчета охватывает различные виды конструкций насосов: со спиральным каналом и роторами различного типа — когтеобразного, звездообразного как с полюсными башмаками, так и без них, а также насосы со спиральным ротором.

РАЗДЕЛ II МГД-МАШИНЫ С РАЗДЕЛЕННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Глава IV

Основные типы МГД-машин с разделенным магнитопроводом

Автоматизация литейных процессов в металлургии требует создания целого ряда дистанционно управляемых узлов, в том числе МГД-насосов, кранов и стопоров. Основные труд-

ности создания этих устройств связаны с активным действием жидкого металла на стенки канала, а также с наличием высоких температур расплавленного металла, уменьшающих надежность устройств. Для преодоления этих отрицательных явлений ведется поиск новых материалов для стенок канала или стойких покрытий и разработка новых конструкций обеспечивающих надежность работы при высоких температурах.

Нами предлагаются новые конструкции МГД-машин для высокотемпературных сплавов, изучению которых посвящен второй раздел диссертации.

МГД-машины с разделенным магнитопроводом при работе в тормозном режиме (кран, стопор) рассматриваются как явнополюсные, но в насосном и генераторном режимах — как неявнополюсные. Своеобразие конструкции машин с разделенным магнитопроводом является причиной того, что рассмотрение этого типа машин выделяется в отдельный раздел.

Предлагаемая МГД-машина (насос, кран, стопор, генератор) состоит из отдельных стандартных элементов — электромагнитов переменного или постоянного тока. Геометрическая форма электромагнитов в зависимости от их назначения может быть различной конфигурации. Обычно она является Ш- или С-образной. Каждый элемент состоит из обмотки питания и шихтованного в соответствующем направлении магнитопровода. Машина собирается насадкой отдельных элементов (число которых кратно числу фаз) на канал с применением подходящей конструкции для крепления элементов.

При использовании С-образных элементов в рабочем зазоре можно создать более сильные магнитные поля с достаточно равномерным распределением, чем с Ш-образными элементами. В этих конструкциях наблюдается увеличение магнитных потоков рассеяния по сравнению с потоками в обычных индукционных МГД-машинах, особенно между соседними элементами. Эти потоки создают дополнительные потери в магнитопроводе и являются причиной снижения коэффициента мощности. Но несмотря на эти недостатки, МГД-машины с разделенным магнитопроводом имеют ряд преимуществ, особенно при использовании их в металлургии. Насосы и стопоры имеют более простую конструкцию, их проточная часть легко доступна для подготовки к работе и ремонту, что очень существенно в условиях производства.

Быстрая замена выходящих из строя элементов запасными значительно снижает время простоя установки. Изготовление элементов и насоса в целом легко поддается унификации.

Выгодные условия охлаждения обмотки в машинах с разделенным магнитопроводом по сравнению с плоскими индукционными МГД-машинами позволяют работать с расплавленными металлами при температуре до 800°C без принудительного охлаждения обмотки, т. к. ее температура не превышает 200°C .

Конструкции машин с разделенным магнитопроводом являются более «гибкими», и на базе отдельных их элементов можно создать значительное число «гибридов», которые (как, например, машины спирального, центробежного и др. типов) могут найти применение как в металлургии, так и в энергетике.

В этой главе даются нами предлагаемые конструкции насосов с соответствующими параметрами для перекачивания таких металлов, как натрия, олова, магния, алюминия, чугуна и стали. В качестве примера можно привести данные одного насоса, который в настоящее время без принудительного охлаждения работает на жидкометаллическом контуре ДУ-40 в Институте физики АН Латв. ССР. При фазном токе $I_f = 175 \text{ а}$ (длина насоса 1,08 м) он развивает напор $p = 4 \text{ ат}$ при производительности $Q = 12 \text{ л/сек}$. Коэффициент полезного действия — 12%, вес $\approx 300 \text{ кг}$.

Приводится также конструкция с ленточным магнитопроводом из электротехнической стали. Для рационального использования магнитного потока в случаях, когда невозможно применять боковые токозамыкающие шины, необходимо варьировать распределение индукции по ширине канала. Рассматривается одна из конструкций, в которой в середине канала индукция имеет максимум, а к краю уменьшается по линейному закону.

Изучение магнитного поля индукторов показывает, что с ростом полюсного деления τ индукция растет, и при $\tau = 0,5 \text{ м}$, и зазоре $\delta = 0,05 \text{ м}$ можно получить значение индукции $= 0,6 \text{ тл}$.

Существует оптимальная величина паза, обеспечивающая максимум индукции в рабочем зазоре. Найдено, что наилучший гармонический состав индукции в рабочем зазоре получается при плотном размещении элементов, что соответствует тому случаю обычных МГД-машин, когда $q = 1$ (q — число пазов на полюс и фазу).

Экспериментальные исследования распределения магнитного поля показывают, что при холостом ходе огибающей поля внутри зазора является прямая, модулированная зубцовыми пульсациями. Существенное искривление распределения магнитного поля из-за продольного краевого эффекта не наблюдается.

Глава V

Электромагнитный напор МГД-машин с разделенным магнитопроводом

Электромагнитный напор является самым важным показателем МГД-машины вне зависимости от того, в каком режиме она работает — в насосном или тормозном. В отличие от обычных плоских индукционных МГД-машин, в машинах с разделенным магнитопроводом неравномерность зазора выражена сильнее, так как отдельные ее элементы образуют дискретный магнитопровод, создающий более выраженные высшие пространственные гармоники поля. Для простоты определения электромагнитного напора принимается, что каждый элемент создает в рабочем зазоре магнитное поле в виде прямоугольника с шириной, равной ширине элемента. При такой расчетной модели гармоники будут влиять на электромагнитный напор сильнее, чем в эксперименте, но тем самым удастся определить как бы верхний предел влияния высших пространственных гармоник.

Выводы, полученные при анализе теоретического и экспериментального материала по МГД-машинам с каналами, имеющими идеальные боковые токозамыкающие шины, и при небольших значениях магнитного числа Рейнольдса, без обоснования были распространены и на остальные случаи, когда эти условия далеко не выполнены. Это привело к ошибочному представлению о роли высших пространственных гармоник магнитного поля. До сих пор в практических расчетах пренебрегали влиянием высших пространственных гармоник, что дало сильно завышенные расчетные значения электромагнитного напора при росте скорости металла.

В настоящей работе показано, что при отсутствии боковых токозамыкающих шин влияние высших пространственных гармоник на характеристики машин существенно. Они оказывают на жидкий металл сильное тормозящее действие и при расчете МГД-устройств должны непременно учитываться. Так, например, при $a/\tau = 0,2$, где a — полуширина канала и

параметр $\epsilon_q = 4$, они могут снизить электромагнитный напор даже в 2 раза при значениях скольжения $s < 0,5$. При скольжении $s = 1$ их влияние незначительно, поскольку действие гармоник 5-й и 7-й, 11-й и 13-й почти взаимно компенсируется. Эксперимент полностью подтвердил это предположение.

Проблема рационального использования магнитного потока особенно важна для мощных МГД-устройств. С этой целью предлагается определенным образом распределить магнитный поток по ширине канала. Уже из чисто физических соображений следует, что значение индукции целесообразно увеличить там, где полезная компонента тока больше.

Рассматривается задача с индукцией, линейно изменяющейся по ширине канала и максимумом в центре канала. В результате решения задачи с линейно меняющейся индукцией по ширине канала были найдены выражения для коэффициента ослабления напора и рассчитана его зависимость от ϵ_q , a/τ и параметра, характеризующего быстроту спада поля. Приведенные графические зависимости облегчают инженерный расчет. Экспериментальная проверка подтверждает правильность выбранной расчетной модели.

При сохранении постоянства главного магнитного потока, в случае линейного распределения индукции, коэффициент ослабления напора k_{oe} имеет в 3 раза большее значение по сравнению с равномерным распределением того же потока, что приводит к значительному увеличению электромагнитного напора.

В машинах с каналами без боковых шин более рациональным по сравнению с равномерным распределением индукции по ширине канала является линейно падающее к краям канала. Развивая дальше это предположение, получено, что при небольших магнитных числах Рейнольдса оптимальным распределением поля является косинусоидальное. Ожидается некоторое снижение напора в связи с увеличением неоднородности силового поля по сечению канала.

При определении электромагнитного напора самой сложной проблемой является учет продольного краевого эффекта. Многочисленные опубликованные работы по продольному краевому эффекту неявнополюсных МГД-машин не содержат ни одного сравнительно простого выражения, которое можно использовать для инженерного расчета. Для явнополюсных МГД-машин вообще нет работ по продольному краевому эффекту.

Предполагаются две расчетные схемы для учета продольного краевого эффекта. Первая схема пригодна для бесконечно широкого канала или канала с идеальными боковыми токозамыкающими шинами. Она дает возможность оценить влияние геометрических параметров и магнитного числа Рейнольдса на характеристики машины, но расчет получается трудоемким и для инженерного расчета мало пригоден.

Вторая схема определения коэффициента продольного краевого эффекта выбрана очень удачно, так как с помощью простой формулы удается одновременно учесть как конечную ширину, так и конечную длину рабочего участка. В основе этой расчетной модели лежит предположение, что в одном из двух последовательных полупериодов тока токовые линии замыкаются в зоне под индуктором, а в другом полупериоде выходят из зоны, покрытой индуктором. При расчете не учитывается деформация поля, обусловленная движением проводящей среды, что ограничивает область применения этой формулы.

С помощью выражения коэффициента продольного краевого эффекта

$$k_l = \frac{2n-1}{2n} + \frac{1}{2n \left[1 + \frac{\tau k_{oe} (1 + \varepsilon^2)}{0,52 \cdot 2a} \right]}$$

(n — число полюсов; k_{oe} — коэффициент ослабления напора; $2a$ — ширина канала) можно оценить изменение напора в зависимости от длины насоса и в двух последовательных периодах действия насоса. Это необходимо учитывать при создании металлургических устройств, где применение шин исключено в связи с отсутствием подходящих материалов. Кроме того, в двух последовательных полупериодах действия насоса можно ожидать столь значительные колебания электромагнитного напора, что при небольших частотах питания ($f \leq 5$ гц) могут наступить резонансные механические колебания всей системы, что необходимо учитывать при проектировании мощных металлургических МГД-устройств.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований удается определить самый важный показатель МГД-машин — электромагнитный напор с учетом всех трех краевых эффектов: толщинного, продольного и поперечного. Точность определения электромагнитного напора ($\pm 15\%$) при этом до-

статочно высока, чтобы обеспечить надежный расчет остальных характеристик машины. По электромагнитному напору МГД-машины с разделенным магнитопроводом не уступают неявнополюсным линейным МГД-машинам.

Глава VI

Гидравлические характеристики и особенности определения к. п. д. МГД-машин с разделенным магнитопроводом

Гидравлические характеристики МГД-машин, предназначенных для энергетики, значительно отличаются от характеристик машин, предназначенных для металлургии. В первом случае используются в основном щелочные металлы с небольшим удельным весом, и оптимальный режим по к. п. д. обеспечивается при сравнительно больших скоростях течения жидкого металла, и оптимальное значение скольжения лежит в пределах $S = 0,3 \div 0,6$. В этих машинах сильно выражено действие высших пространственных гармоник поля, шунтирующего эффекта, неоднородного распределения сил по сечению канала на гидравлические характеристики, т. к. их влияние растет с уменьшением скольжения, т. е. с ростом скорости жидкого металла.

В МГД-устройствах металлургического назначения обычно удельный вес жидкого металла велик, что создает большие гидравлические потери напора уже при сравнительно небольших скоростях жидкого металла, т. е. при значениях скольжения, близких к единице. Это приводит к снижению к. п. д. устройства, который в конечном счете составляет всего несколько процентов, но что вполне приемлемо для металлургии, т. к. затраты тепловой энергии для поддержания технологического процесса значительно больше, чем выделяемые в МГД-устройствах.

Поэтому на первый план выдвигается требование **надежности** и обеспечения необходимого напора при высокотемпературном режиме работы и **допустимых габаритах** устройства.

Изучение гидравлических характеристик МГД-машин с разделенным магнитопроводом проводится с учетом именно этих основных условий.

Полученные методом «подвешенного индуктора» гидравлические характеристики МГД-насосов с каналами без шин

показывают, что во многих случаях с ростом скорости жидкого металла значительное влияние на характеристики оказывают высшие пространственные гармоники поля.

Примененная методика позволяет определить отдельно влияние высших пространственных гармоник. По силе реакции индуктора определяется электромагнитный напор. Анализ теоретических и экспериментальных данных показывает, что при расчете характеристик МГД-машин любых видов высшие пространственные гармоники необходимо учитывать в тех случаях, когда канал не имеет боковых токозамыкающих шин, а также во всех случаях при больших значениях магнитного числа Рейнольдса, при $\epsilon > 3$.

Результаты опытов показывают существенную роль шунтирующих токов, проводящих стенок канала и гидравлических потерь напора при неоднородном распределении сил по сечению канала. Определить влияние каждого из этих явлений в отдельности невозможно, так как для этого потребовалось бы подвесить жидкометаллический контур и измерить действующую на него силу реакции.

Изучение гидравлических характеристик (напор, производительность) насосов с разделенным магнитопроводом показывает, что они не уступают по этим характеристикам линейным неявнополюсным МГД-насосам, но в то же время обеспечивают надежную работу при высоких температурах.

Наряду с насосным, не менее важным режимом является тормозной. В результате проведенных опытов с жидким оловом, являющимся моделирующей средой, устанавливается полная возможность использования индукционных МГД-тормозов для удобного и весьма эффективного регулирования разнообразных течений жидких металлов. Так, например, при открытом конце канала тормозящий напор составляет 70% от электромагнитного напора, а при применении перегородок в конце канала и оставлении для истечения только части сечения канала — $0,28 a/a_0$ (a_0 — ширина канала) весь электромагнитный напор p_e почти полностью идет на торможение. В режиме стопора, т. е. при полном закрытии течения — соответственно — в первом случае — $0,65 p_e$ и во втором — $0,95 p_e$.

Впервые осуществляется изучение течения жидкого металла в пульсирующем магнитном поле. Опыт показывает, что по мере повышения частоты уменьшается тормозящая сила, и при достаточно высоких частотах наблюдается даже

перемена ее направления, что и предсказывается теорией. Пульсирующее поле является более общим случаем, так как оно состоит из двух бегущих полей и в предельном случае при частоте, равной нулю, представляет собой постоянное поле.

Информация, полученная при изучении пульсирующего поля, весьма ценная, так как может быть использована при анализе продольного краевого эффекта и течения металла в неоднородном постоянном поле. Установлено, что весьма эффективное действие магнитного поля на движущийся металл проявляется при нулевой частоте. Это открывает возможности использования постоянного магнитного поля для регулирования, например, истечения металла из печи, ковшей и т. п.

Хорошие гидравлические характеристики МГД-машин с разделенным магнитопроводом создают предпосылки для их использования в испытательных жидкометаллических контурах и установках энергетического назначения. Подробно изучается коэффициент полезного действия этого типа машин. Анализируется удельный вклад отдельных потерь. Выводятся выражения для к. п. д., содержащие критерий в безразмерном виде с учетом основных видов потерь: гидравлических, джоулевых в жидком металле и стенках канала и в обмотке возбуждения. Кроме того, при определении к. п. д. учитываются потери в магнитопроводе и дополнительные потери, создаваемые высшими пространственными гармониками поля.

Устанавливается, что при определении коэффициента полезного действия МГД-машин с разделенным магнитопроводом следует учитывать дополнительные потери в магнитопроводе, возникающие от потоков рассеяния, и потери, создаваемые высшими пространственными гармониками. Первые могут быть определены исключительно опытным путем, что создает определенные трудности при проектировании мощных установок, так как там требуется предварительное сложное конструирование моделей и их последующее исследование.

Имеющаяся информация о высших пространственных гармониках, полученная при исследованиях как электрических, так и магнитогидродинамических машин, позволяет расчетным путем учесть эти потери. Остальные потери определяются теми же методами, что и в других типах МГД-машин. С учетом дополнительных потерь в машинах с разделенным магнитопроводом их к. п. д. на 20—30% ниже, чем у обычных индукционных.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы возможности МГД-устройств, в которых бегущее магнитное поле реализуется механическим перемещением источников магнитного поля. Специфические преимущества подобного рода устройств обусловлены, во-первых, высоким значением коэффициента мощности ($\cos\varphi$), что равносильно работе с низкими напряжениями. В случае постоянных магнитов к зоне с жидким металлом внешнее напряжение вообще не подводится. Во-вторых, для создания бегущего магнитного поля можно использовать разного рода привод.

Установлено, что подобного рода МГД-устройства по своим гидравлическим и весовым характеристикам и коэффициенту полезного действия не уступают неявнополюсным индукционным насосам. При небольших гидравлических мощностях и при большой скорости поля насосы с постоянными магнитами имеют большее значение к. п. д., чем неявнополюсные машины.

2. Предложено использовать для создания бегущего магнитного поля систему, состоящую из отдельных индукторов пульсирующего магнитного поля. Таким путем достигается существенное упрощение по части конструирования, изготовления, эксплуатации и ремонта. Все трудности по этой части сводятся к отдельным элементам значительно более простым, чем индуктору в целом. Появляется возможность удаления обмотки от зоны с жидким металлом.

Установлено, что подобного рода устройства по сравнению с неявнополюсными машинами при одних и тех же значениях гидравлических характеристик имеют несколько заниженное значение к. п. д. (на 20÷30%), повышенный вес (в 1,5÷2 раза) и более низкое значение $\cos\varphi$ (в 1,5—2 раза). Поэтому пока проблематичен вопрос о целесообразности использования этих устройств в режиме генерирования.

Но в режиме насоса конструктивно-технологические преимущества рассматриваемых устройств часто явно преобладают над ухудшением энергетических показателей. Особенно это относится к задачам металлургии.

3. Изложенные в пунктах 1 и 2 результаты можно рассматривать как конкретную иллюстрацию утверждения, что идя по пути модификации и упрощения конструкции индуктора, выявляются такие качества высокотемпературных МГД-устройств, которые создают новые возможности для более широкого их применения. Результаты эти свидетельствуют так-

же о том, что дальнейшие исследования в этом направлении безусловно являются одной из основных задач для создания действительно-работоспособных высокотемпературных МГД-устройств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ:

Монография

1. Т. К. Калнинь. Явнополюсные МГД-насосы. Изд-во «Зинатне», Рига, 1969.

Статьи и опубликованные доклады

2. Т. К. Калнинь, И. М. Кирко. Магнитное и тепловое моделирование электромагнита. М., 1959.

3. Т. К. Калнинь. Моделирование магнитных систем постоянного поля. Автореферат канд. диссертации, Рига, 1961.

4. А. К. Бушман, Т. К. Калнинь. Применение постоянных магнитов в индукционных насосах: — Сб.: Вопросы магнитной гидродинамики, Рига, 1963, 128.

5. Э. В. Блейер, Т. К. Калнинь, Р. Р. Кришберг, Я. Я. Лиелпетер, Ч. К. Микрюков, Г. А. Окунев. Экспериментальное исследование плоских индукционных насосов. Изв. АН Латв. ССР, сер. физ. и техн. наук, 1964, № 2, 27.

6. Т. К. Калнинь. О новом индукционном насосе для перекачки жидких металлов. — Магнитная гидродинамика, 1965, 3, 155.

7. Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Э. В. Приедниекс. Напор и электрические потери в слое жидкого металла явнополюсных индукционных насосов. — Магнитная гидродинамика, 1965, 4, 91.

8. Я. Я. Валдманис, Т. К. Калнинь. Электромагнитный напор и потери в индукционном насосе с движущимися полюсами. — Изв. АН Латв. ССР, сер. физ. и техн. наук, 1966, 5, 95.

9. Т. К. Калнинь, Э. В. Приедниекс. Определение электромагнитного напора в явнополюсных индукционных насосах с учетом толщинного краевого эффекта. — Магнитная гидродинамика, 1967, 3, 137.

10. Т. К. Калнинь, А. Калнинь, В. Рупейайтс, К. Пунтинь. Оловянный контур. — Магнитная гидродинамика, 1967, 4, 152.

11. А. К. Бушман, Т. К. Калнинь, Я. Я. Лиелпетер. К расчету геометрии зубцовой зоны магнитопровода трехфазной индукционной МГД-машины. — Изв. АН Латв. ССР, 1967, 4.

12. Я. Я. Валдманис, Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Я. Э. Полманис. Насос с линейно меняющимся магнитным полем по ширине канала. — Магнитная гидродинамика, 1969, 1, 86.

13. Т. К. Калнинь, Я. Э. Полманис. О трехфазном индукционном насосе с разделенным магнитопроводом. — Магнитная гидродинамика, 1969, 2, 107.

14. Т. К. Калнинь. О роли высших пространственных гармоник в индукционных МГД-машинах с конечной шириной канала. — Магнитная гидродинамика, 1969, 3, 147.

15. Б. Л. Биргер, В. С. Горовиц, Т. К. Калнинь, Я. Э.

Полманис. Математическая модель индукционных МГД-машин с разделенным магнитопроводом. — *Магнитная гидродинамика*, 1969, 4, 78.

16. Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Э. В. Приедниекс. Исследование явнополюсного МГД-насоса с постоянными магнитами. — *Магнитная гидродинамика*, 1970, 1, 144.

17. Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Э. В. Приедниекс. Толщинный краевой эффект в неявнополюсных магнитороторных индукционных насосах. — *Магнитная гидродинамика*, 1970, 1, 121.

18. А. Я. Калнинь, Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Я. Э. Полманис. Использование пульсирующего магнитного поля для регулирования скорости течения жидкого металла. — *Магнитная гидродинамика*, 1970 4.

19. А. Калнинь, Т. К. Калнинь, К. Я. Путниньш, В. Рупенейтс. Регулирование скорости течения проводящей жидкости с помощью электромагнитного поля. Материалы 5-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике, Рига, 1966.

20. Т. К. Калнинь, Я. Э. Полманис. Трехфазный индукционный насос с разделенным магнитопроводом. Материалы 6-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике, II, Рига, 1968, 34.

21. Т. К. Калнинь, Я. Э. Полманис. Экспериментальное исследование трехфазного электромагнитного индукционного насоса с разделенным магнитопроводом. Материалы 6-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике, II, Рига, «Зинатне», 1968, 37.

22. А. Калнинь, Т. Калнинь, Я. Полманис, К. Путниньш, В. Рупенейтс. О гидравлике индукционного насоса, работающего в режиме крана и стопора. Материалы 6-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике, II, Рига, 1968, 39.

23. Т. К. Калнинь, Р. А. Петровича, Э. В. Приедниекс. Расчет электромагнитного давления индукционного насоса с движущимися полюсами. Материалы 6-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике, II, Рига, 1968, 50.

24. Т. К. Калнинь, Я. Э. Полманис, Г. Я. Сермонс. Расчет напора с учетом высших пространственных гармоник магнитного поля. *Магнитная гидродинамика*, 1971, 2, 97.

Патенты и авторские свидетельства

25. Т. К. Калнинь. Трехфазный электромагнитный индукционный насос. — Авт. свид. 229223, 08. VIII. 1963.

26. T. K. Kalnin. Three-Phase Linear Induction Pump for Pumping Electroconductive Liquids at High Temperature. — Patent Nr. 1071563. England, 1966.

27. T. K. Kalnin. Pompe linéaire triphasée à induction pour liquides électroconducteurs à haute température. — Brevet D'Invention, N° 1467512, République Française, 1966.

28. T. K. Kalnin. Lineare Drehstrominduktionspumpe zum Umwälzen elektrischleitender Flüssigkeiten bei hoher Temperatur. Offenlegungsschrift 1553086, Bundesrepublik Deutschland, 1970.