

А. И. ВОЛЬДЕК, Г. Х. ВЯЛЪЯМЯЭ, Х. В. СИЛЛАМАА,
Х. А. ТИЙСМУС

**Экспериментальное исследование магнитных
полей в индукционных машинах и насосах для
жидких металлов с разомкнутым магнитопроводом**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

Серия А

№ 131

1958

А. И. ВОЛЬДЕК, Г. Х. ВЯЛЪЯМЯЭ, Х. В. СИЛЛАМАА,
Х. А. ТИЙСМУС

**Экспериментальное исследование магнитных
полей в индукционных машинах и насосах для
жидких металлов с разомкнутым магнитопроводом**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

Ep. 2302

~~p 37 827~~



Вводные замечания

Электромагнитные насосы для жидких металлов находят применение в ядерных реакторах тех типов, в которых в качестве теплоносителя использованы жидкие металлы (например натрий, калий, висмут). Намечается также их применение в металлургическом и литейном производстве. Решение ряда задач в этих областях с помощью электромагнитных насосов представляется весьма заманчивым.

По принципу своего действия электромагнитные насосы имеют много общего с электрическими двигателями: если в электродвигателе электромагнитные силы действуют на проводники с током, то в электромагнитных насосах эти силы возникают от взаимодействия с токами, протекающими в жидком металле, и приводят этот металл в движение. Таким образом различным типам электродвигателей можно сопоставить соответствующие типы электромагнитных насосов.

Электромагнитные насосы можно разбить на два основных класса: кондуктивные и индуктивные. В первых из них ток в жидком металле создается с помощью внешних э. д. с., посредством соответствующей системы электродов. В насосах второго типа токи в жидком металле индуктируются движущимся относительно жидкого металла магнитным полем. Преимуществом насосов последнего типа является то обстоятельство, что они не нуждаются в специальных источниках весьма больших токов и в электродах для подвода тока к жидкому металлу.

Наряду с вышеупомянутыми общими с электродвигателями принципами действия электромагнитные насосы имеют весьма много специфических свойств, отличающих их от электрических машин. К таким свойствам относятся: 1) неизбежные большие немагнитные зазоры в магнитной

системе; 2) наличие жидких проводников электрического тока; 3) в линейных насосах разомкнутые магнитные цепи, в отличие от нормальных электрических машин, где магнитные цепи являются замкнутыми кольцевыми и т. д.

Ряд исследований по электромагнитным насосам в СССР был выполнен в Институте физики АН Латвийской ССР [Л. 1, 2, 3, 4]. В этих работах рассматриваются вопросы, касающиеся распределения магнитного поля в воздушном зазоре индукторов, развиваемого насосом давления, течения жидкости и т. д.

В иностранной периодике имеется довольно много публикаций об электромагнитных насосах. Однако, за редкими исключениями [Л. 5 и др.], они содержат лишь информацию о принципах действия и устройства насосов различных типов и некоторый описательный материал. В недостаточной степени представлены также экспериментальные и эксплуатационные данные.

В Таллинском политехническом институте под руководством д. т. н. А. И. Вольдек была выполнена достаточно обширная работа по исследованию индукционных электромагнитных насосов с целью дальнейшего углубленного изучения происходящих в них электромагнитных процессов и создания достаточно надежных основ для расчета полупромышленных образцов различных видов индукционных насосов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований в целом изложены в отчете по указанной работе [Л. 9] и будут опубликованы в виде серии статей.

Наибольшее практическое значение имеют линейные индукционные насосы. У последних магнитная система является разомкнутой, подобно магнитофугальным индукционным машинам.

Одно из центральных мест в теории линейных индукционных насосов занимает изучение распределения магнитных полей и разработка мер для получения рационального их распределения. Поэтому этот вопрос был тщательно исследован теоретически и экспериментально. В данной статье излагаются методы и результаты экспериментального исследования магнитных полей на моделях линейных индукционных насосов.

Хотя перечисленные вопросы практически изучались в связи с исследованием линейных индукционных насо-

сов, они в полной мере относятся также к индукционным машинам с разомкнутым магнитопроводом, поскольку магнитные системы и обмотки в обоих случаях являются совершенно идентичными.

1. Объекты исследования магнитных полей индукторов и методика измерений

С целью экспериментального исследования различных образцов индукторов в лаборатории электрических машин ТПИ было изготовлено четыре основных типа

Таблица № 1

	Тип индуктора			
	Плоский с двух- сторонней обмоткой		Цилиндрический с односторонней обмоткой	
Общая длина индуктора мм	757		760	
Размеры пакета сердечника мм	63×167		45×200	
Число пазов	36		36	
Размеры зубца мм	11×47		12×50	
Размеры паза мм	10×47		9×50	
Тип обмотки	одно- слойная	двух- слойная	дисковая	
Число пар полюсов	3	2	2	3
Число пазов на полюс и фазу	2	3	3	2
Число эффективных проводников в пазу	18	16	18	54
Число витков в катушке	18	8	18	54
Размеры проводника в мм	3×ø 2,26	3×ø 2,26	3×ø 2,26	1×ø 2,26
Длина витка в м	0,72	0,71	0,36	0,36
Число витков в фазе	216	192	216	648
Относительный шаг	1	8/9	—	—
Число витков корригирующей катушки	62	60	—	—
Размеры проводника корр. кат. в мм	ø 2,26	ø 2,26	—	—
Сопротивление фазы при 15° С ом	0,226	0,200	0,110	0,990
Соединение обмоток индуктора	посл. \downarrow	посл. \downarrow	\downarrow	\downarrow

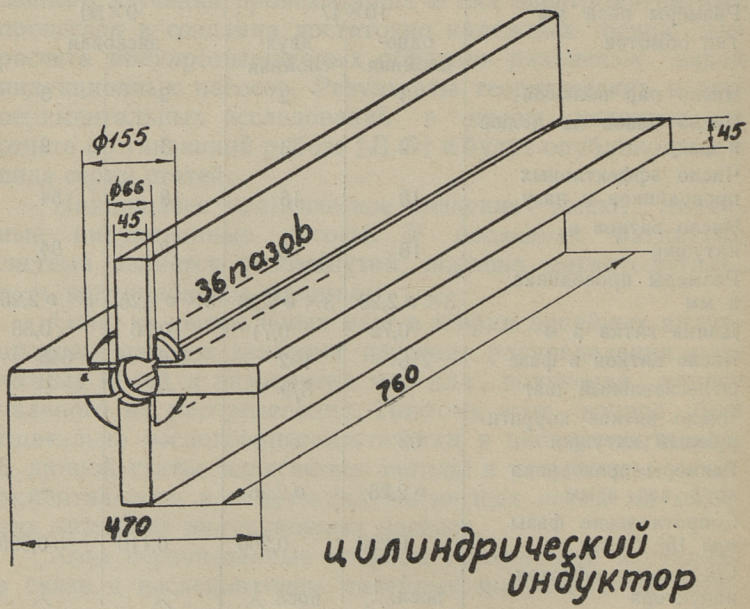
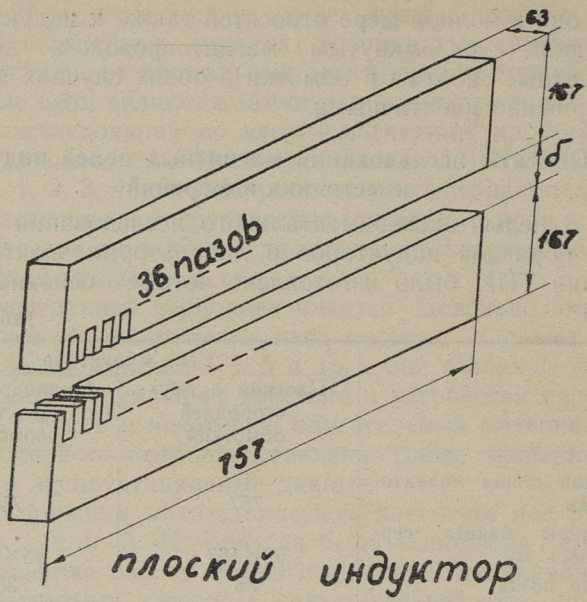


Рис. 1

трехфазных индукторов с различными модификациями обмоток.

Теоретические исследования показали, а опыты на моделях подтвердили, что наиболее перспективными для практического применения являются два типа индукционных насосов: 1) линейный плоский индуктор с двухсторонней обмоткой и 2) линейный цилиндрический индуктор с односторонней обмоткой и с сердечником из ферромагнитного материала.

В табл. 1 приводятся некоторые параметры экспериментальных образцов индукторов этих насосов, а общие схемы магнитной системы с указанием основных размеров представлены на рис. 1.

Магнитопровод для плоского и цилиндрического индуктора был изготовлен из листовой электротехнической стали марки Э 41 толщиной 0,5 мм. Внутренний сердечник для цилиндрического индуктора изготовлялся из предварительно отожженной стальной проволоки диаметром 1,0 мм и имел внешний диаметр 30 мм. Длина его совпадала с длиной магнитопровода индуктора (760 мм).

Указанные индукторы испытывались при различных типах обмоток, данные которых приведены в табл. 1.

Исследование магнитных полей индукторов проводилось путем определения с помощью зонда-катушки магнитной индукции в исследуемой точке пространства (в точке расположения зонда). Сам зонд представлял собой цилиндрическую катушку с внешним диаметром 7 мм и высотой 3 мм, намотанную на пластмассовый каркас проводом ПЭЛ — 0,07 мм. Количество витков составляло 900, а сопротивление катушки 75 ом. Э.д.с., индуцированная магнитным полем индукторов в измерительной катушке, измерялась ламповым вольтметром типа ЛВ9-2 (класс точности 2,5). Последний по существу измеряет амплитудное значение напряжения, хотя проградуирован по действующему значению в предположении синусоидальности напряжения. В условиях опыта вследствие отсутствия насыщения магнитные поля изменялись во времени синусоидально (это обуславливается значительными воздушными зазорами в магнитной системе индукторов). Максимальное значение потокосцепления катушки $\Psi_{\text{макс}}$

поэтому можно определить из общеизвестной формулы

$$E = 4,44 f \cdot \Psi_{\text{макс}},$$

где f — частота и E — действующее значение индуктированной э.д.с., которая измеряется ламповым вольтметром. Определение магнитной индукции по результатам измерения э.д.с. (или потокосцепления) возможно при условии равномерного поля в пределах катушки. Этим на зонд-катушку накладывается требование малых геометрических размеров. Действительная постоянная катушки применительно к данному ламповому вольтметру была определена экспериментально в условиях однородного магнитного поля известной интенсивности. Постоянная катушки оказалась равным $C = 7,57 \frac{В \cdot М^2}{Вб}$, поэто-

му при нижнем пределе измерения лампового вольтметра (10 мв) оказалось возможным измерение индукции начиная с нескольких гаусс. Погрешности измерения магнитных полей указанным способом, в условиях однородного поля, могут быть оценены величиной 2—3%.

Одновременно с измерением магнитных полей был определен электрический режим питания обмоток индукторов, включенных по схеме звезды, причем измерялись линейные и фазные напряжения, фазные токи и активные мощности в каждой фазе.

2. Магнитное поле плоского индуктора

В линейных индукторах, благодаря разомкнутому магнитопроводу, распределение магнитного поля вдоль воздушного зазора, по сравнению с нормальными индукционными машинами, искажается и в результате этого возникают различные нежелательные явления (увеличение потерь и реактивной мощности, искажение симметрии токов и т. д.). Поэтому подробное исследование магнитных полей индукторов имеет весьма важное значение для разработки индукционных насосов, обладающих достаточными техническими и экономическими показателями. Хотя вопросам магнитных полей в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом посвящен ряд исследований [Л. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], они все же не были разработаны в достаточной степени.

Исследование магнитного поля в воздушном зазоре плоского линейного индуктора показывает, что при симметричной системе фазных токов в обмотке в воздушном

зазоре кроме полезной бегущей составляющей поля возникают еще пульсирующие составляющие. Это явление принято называть продольным краевым эффектом.

При наличии в воздушном зазоре только бегущего магнитного поля амплитуда магнитной индукции вдоль воздушного зазора, если не учитывать влияния пазов, не изменяется. Однако в случае, когда существует также пульсирующее поле, накладывающееся на бегущее, в кривой распределения амплитуды магнитной индукции вдоль воздушного зазора появляются явно выраженные максимумы и минимумы. Подобное явление неоднократно устанавливалось при практических измерениях [Л. 4, 7, 8]. Г. И. Штурман произвел теоретическое исследование поля в воздушном зазоре асинхронной машины с разомкнутым магнитопроводом [Л. 6]. Им было установлено, что при разомкнутом магнитопроводе вследствие явления шунтирования и насыщения ярма возникают пульсирующие составляющие магнитного поля, которые и являются причиной искажения кривой магнитной индукции в воздушном зазоре. Однако, несмотря на ряд исследований, вопрос не был выяснен до конца и не было разработано практических мер для уничтожения пульсирующих составляющих полей. В последнее время такая попытка была сделана Л. Р. Блейком [Л. 5]. Однако, последний исходит из ошибочных теоретических предположений, частично вскрытых уже в дискуссии по его работе [Л.5], и поэтому предлагаемые им меры также не решают вопроса.

В нашей работе [Л. 9] вопрос был подвергнут достаточно тщательному теоретическому и экспериментальному исследованию, исходя из работы Г. И. Штурмана [Л. 6]. При этом был выявлен ряд добавочных интересных моментов, а также выработаны эффективные меры для улучшения или корригирования поля в воздушном зазоре. Теоретический анализ вопроса будет дан в отдельной статье. В данной статье приводятся результаты экспериментального исследования этого вопроса.

В индукционных насосах, благодаря значительным воздушным зазорам и отсутствию насыщения в ярме, имеет практическое значение только пульсирующая составляющая поля, вызванная явлением шунтирования, т. е. наличием магнитного потока («шунтирующего пото-

ка») между двумя сердечниками плоского индуктора. Шунтирующий поток появляется в воздушном зазоре между сердечниками около их концов, за пределами обмотки (от последнего паза до края ярма), как это указывалось уже ранее [Л. 6, 7]. Однако, как показали наши исследования, существует также довольно значительный шунтирующий поток между ярмами вне воздушного зазора через боковые, торцевые и даже обратные стороны сердечников.

Поэтому, наряду с измерением распределения магнитной индукции в воздушном зазоре было проведено исследование шунтирующих магнитных потоков между сердечниками. Для этого все боковые, торцевые и обратные стороны одного сердечника были охвачены измерительными витками, позволяющими по индуктированной в этих витках э.д.с. определить магнитные потоки, проходящие через данную поверхность сердечника. Кроме того, благодаря соответствующему соединению отдельных витков можно было измерять и суммарный шунтирующий поток от одного сердечника в другой через боковые, торцевые и обратные стороны сердечника.

Результаты измерения распределения максимального значения перпендикулярной (рабочей) составляющей магнитной индукции вдоль середины воздушного зазора в плоском индукторе с двухсторонней однослойной обмоткой при различных воздушных зазорах приведены на рис. 2, а результаты аналогичных измерений в плоском индукторе с двухсторонней двухслойной обмоткой представлены на рис. 3. Как видно из графиков, магнитное поле обладает в воздушном зазоре сильной неравномерностью, что и свидетельствует о наличии значительной пульсирующей составляющей. Как следует из теории [Л. 9], симметричная картина распределения поля в зазоре имеет место, если пульсирующая составляющая поля вызвана только явлением шунтирования. Кривые рисунка 2 и 3 именно и соответствуют этому случаю.

Более подробное исследование явления шунтирования дало результаты, представленные в табл. 2. Там приведены значения измеренных вышеописанным способом магнитных потоков, проходящих через боковые, торцевые и обратные грани сердечников, а также суммарный шунтирующий поток (вне воздушного зазора) между сердеч-

Таблица 2

№ поз.	Тип обмотки	Тип коррекции	Зазор мм	Средний фазный ток а	Шунтирующие потоки в милливеберах				Полезные потоки в милливеберах			Потоки лобовых частей в милливеберах			Фазные токи в амперах		
					Боковые стор. мвб	Торцевые стор. мвб	Обратные стор. мвб	Суммарные мвб	Фаза А мвб	Фаза В мвб	Фаза С мвб	Фаза А мвб	Фаза В мвб	Фаза С мвб	IA а	IB а	IC а
1	Двухсторонний плоский индуктор с двухслойной обмоткой	Некорригированная обмотка	10	8,61	0,146	0,202	0,239	0,549	5,94	6,16	6,44	2,36	2,16	2,16	8,80	9,14	7,88
2		Коррекция короткозамкнутой катушкой		8,94	0,093	0,140	0,128	0,230	5,80	5,80	6,16	2,36	2,00	2,32	9,03	9,26	8,52
3		Корректирующая катушка в средней фазе		9,07	0,161	0,103	0,046	0,018	5,84	5,58	5,76	2,38	1,94	2,36	9,29	9,34	8,58
4		Некорригированная обмотка	29	9,03	0,070	0,153	0,213	0,374	2,44	2,28	2,48	2,22	1,98	2,14	8,92	9,60	8,57
5		Коррекция короткозамкнутой катушкой		9,13	0,114	0,116	0,123	0,160	2,62	2,74	2,84	2,05	1,58	1,90	9,07	9,40	8,91
6		Корректирующая катушка в средней фазе		8,68	0,150	0,080	0,050	0,021	2,84	3,06	3,14	2,18	1,80	2,24	8,88	9,35	7,81
7	Двухсторонний плоский индуктор с однослойной обмоткой	Некорригированная обмотка	11	17,5	0,266	0,092	0,162	0,193	26,08	27,0	25,36	2,66	2,92	2,38	18,1	18,4	16,0
8		Коррекция короткозамкнутой катушкой		17,6	0,133	0,074	0,058	0,162	26,08	27,44	24,94	2,66	2,95	2,39	18,2	18,4	16,3
9		Коррекция дополнительными катушками		17,8	0,079	0,207	0,043	0,178	41,40	41,30	40,30	4,21	4,88	4,12	18,2	18,0	17,1
10		Дополнительные катушки и короткозамкнутые катушки		17,8	0,055	0,207	0,026	0,182	40,54	40,18	39,60	4,18	4,86	3,94	18,2	18,1	17,1
11		Некорригированная обмотка	33	18,4	0,153	0,070	0,135	0,091	11,78	12,14	11,60	2,36	2,63	2,23	18,8	19,3	17,1
12		Коррекция короткозамкнутой катушкой		18,4	0,088	0,062	0,056	0,101	11,70	12,14	11,70	2,36	2,66	2,22	18,7	19,2	17,2
13		Коррекция дополнительными катушками		17,7	0,089	0,162	0,046	0,112	17,00	17,08	11,64	3,46	4,09	3,21	18,1	18,0	17,0
14	Дополнительные катушки и короткозамкнутые катушки	18,0		0,076	0,167	0,030	0,116	17,62	17,88	17,40	3,59	4,24	3,35	18,4	18,3	17,4	

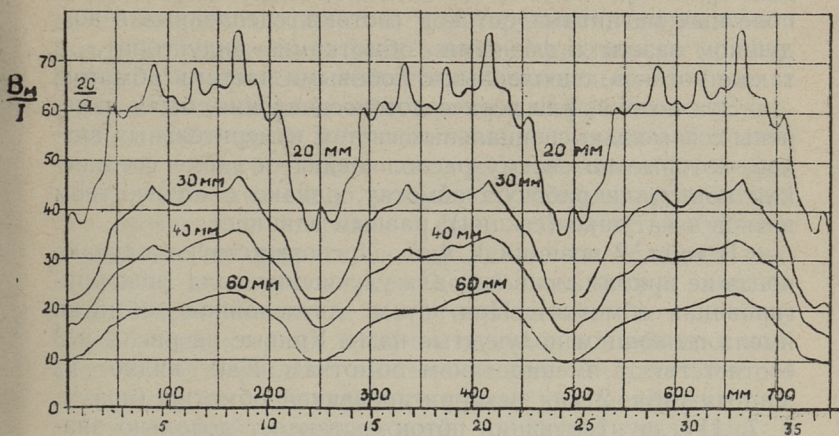


Рис. 2.

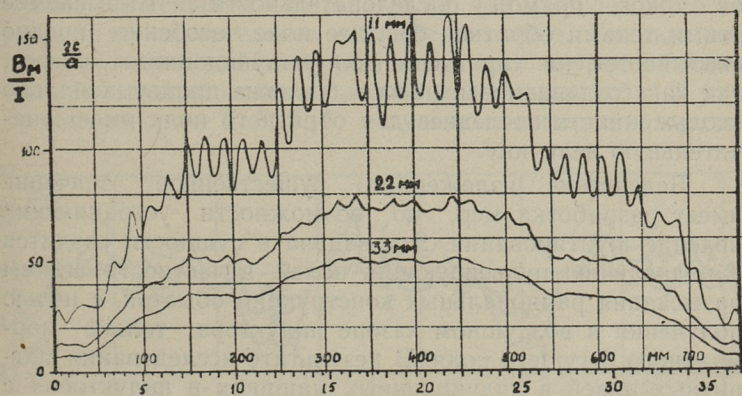


Рис. 3.

никами при различных воздушных зазорах как в случае однослойной обмотки, так и для двухслойной обмотки. Для сравнения там же приведены измеренные значения полезных магнитных потоков (потоки, сцепленные в воздушном зазоре с фазными обмотками индуктора), а также потоков, сцепленных с лобовыми частями обмоток.

Эти потоки, или вернее потокосцепления, были измерены с помощью специальных систем измерительных витков, которые по своему расположению и схеме соединения повторяли рабочую обмотку, однако с количеством витков в катушке (секции), равным единице.

В табл. 2 позиции 1, 4, 7, 11 соответствуют случаю, когда не принималось мер для улучшения поля (некорригированная обмотка). При этом двухслойная обмотка имела по концам полупустые пазы. Кривые на рис. 2 и 3 соответствуют именно таким обмоткам. Как видно из данных табл. 2 для некорригированной обмотки (поз. 1, 4, 7, 11), шунтирующий поток составляет довольно значительную величину, особенно в случае индуктора с однослойной обмоткой. Из таблицы видно также, что система фазных токов при этом обладает значительной асимметрией, появляются токи обратной последовательности (согласно подсчетам, они получаются порядка 10—20% от токов прямой последовательности). Вызываемое этими токами обратное бегущее поле особенно вредно сказывается на характеристики индукционного насоса, так как создаваемое в насосе давление пропорционально скольжению, а последнее для обратного поля имеет значительную величину.

Вследствие изложенного существенное значение имеет разработка мер, по возможности устраняющих явление шунтирования. Эта задача в сущности сводится к подавлению пульсирующих полей, в частности путем разыскания рациональных конструкций обмоток, с целью получения в воздушном зазоре индуктора только нормального бегущего поля. В результате исследования магнитных полей в индукционных машинах и индукторах с разомкнутой магнитной цепью А. И. Вольдеком были предложены некоторые способы коррекции магнитного поля с целью подавления пульсирующей составляющей, которые при экспериментах дали положительные результаты.

Существо этих способов коррекции основывается на указанном уже выше обстоятельстве, что в индукционных насосах существует практически только пульсирующее поле, вызванное эффектом шунтирования, причем это поле распределено во всем зазоре практически равномерно, а во времени меняется синусоидально в фазе с токами средней фазы обмотки индуктора. Поэтому коррекция магнитного поля возможна с помощью дополнительной корригирующей катушки, обмотанной вокруг всего сердечника около воздушного зазора и включенной последовательно в среднюю фазу обмотки индуктора. Подобным же корригирующим действием обладает аналогичная, но короткозамкнутая обмотка вокруг сердечника. Эксперименты с корригированными по данному способу индукторами в случае однослойной обмотки полностью подтверждают вышесказанное. Так, на рис. 4 представлены сравнительные кривые распределения перпендикулярной составляющей магнитной индукции в середине воздушного зазора. Кривая 1 относится к некорригированной обмотке, кривая 2 к случаю коррекции с короткозамкнутой обмоткой, а кривая 3 к коррекции с катушкой в средней фазе обмотки. Несмотря на то, что корригирующие катушки ошибочно были намотаны с несколько меньшим числом витков, чем это следовало из теории, их значительное влияние очевидно. Уменьшение шунтирующего действия под влиянием корригирующих катушек подтверждается также и данными табл. 2, где приведены (поз. 2, 3, 5, 6) результаты измерения шунти-

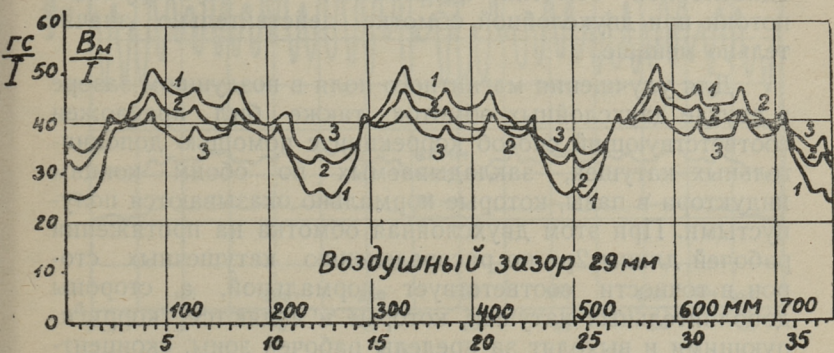


Рис. 4

рующих магнитных потоков при различных способах коррекции. Сравнение данных показывает, что шунтирующие потоки в результате коррекции уменьшаются в несколько десятков раз (поз. 1—6). Улучшается также симметрия токов.

Несмотря на простые возможности улучшения характера магнитного поля в случае однослойных обмоток в плоском индукторе, эти обмотки в индукционных насосах мало перспективны, в частности из-за значительных магнитных потоков рассеяния, связанных с длинными лобовыми частями обмоток (см. табл. 2). Лучшие результаты получаются в случае двухслойных и однослойных цепных обмоток.

Для нормальных, некорректированных двухслойных обмоток также свойственно появление пульсирующей составляющей поля, хотя в меньшей мере, — как это уже выявилось в результате теоретического анализа и подтвердилось экспериментами. Так, на рис. 3 приведено измеренное распределение перпендикулярной составляющей магнитной индукции в середине зазора плоского индуктора с двухсторонней двухслойной обмоткой по данным табл. 1. Значительная неравномерность индукции в зазоре свидетельствует о наличии пульсирующей составляющей поля, обусловленной шунтированием и наличием полупустых пазов, влияние которых также в сущности сводится к шунтированию. Это видно также по результатам измерения шунтирующих потоков в табл. 2 (поз. 7 и 11), причем сравнение с аналогичными данными для однослойной обмотки показывает, что шунтирующие потоки при двухслойной обмотке действительно значительно меньше.

Для улучшения магнитного поля в воздушном зазоре в случае двухслойных обмоток также был предложен соответствующий способ коррекции с помощью дополнительных катушек, закладываемых по обоим концам индуктора в пазы, которые нормально оказываются полупустыми. При этом двухслойная обмотка на протяжении рабочей длины $2r_t$ по распределению катушечных сторон в точности соответствует нормальной, а стороны дополнительных катушек, которые и являются корректирующими и выходят за пределы рабочей зоны, сконцентрированы в два слоя в добавочных пазах или располо-

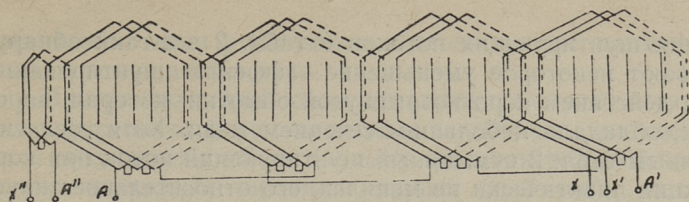


Рис. 5.

жены иным образом вне рабочей зоны. В остальном дополнительные катушки выполняются аналогично основной обмотке. Для дальнейшего уменьшения эффекта шунтирования можно пользоваться короткозамкнутой обмоткой, охватывающей сердечник вблизи воздушного зазора.

На рис. 5 для одной фазы представлена схема использованной в опытах двухслойной обмотки с дополнительными корректирующими катушками (концы X'' , A'' , X' , A'), включаемыми последовательно с основной обмоткой (концы A , X), в соответствии с данными табл. 1. Результаты измерения распределения магнитной индукции в середине воздушного зазора при такой обмотке представлены на рис. 6, откуда видно, что коррекция дает весьма хорошие результаты. Поэтому короткозамкнутая обмотка в данном случае на распределение магнитного поля заметного влияния не оказывает. Результаты изме-

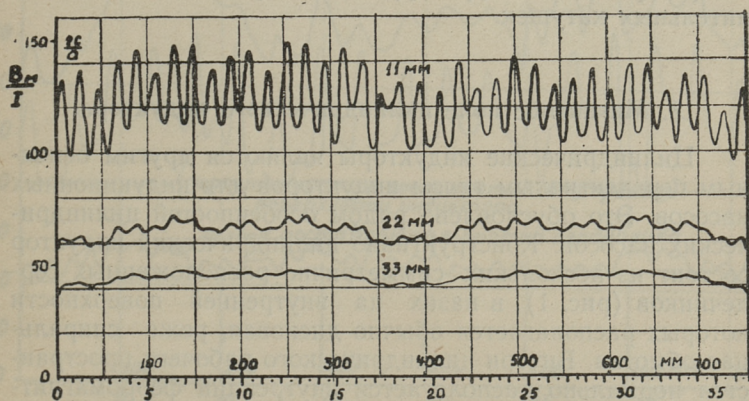


Рис. 6.

рения шунтирующих потоков в табл. 2 все-таки обнаруживают некоторое уменьшение эффекта шунтирования под действием короткозамкнутой обмотки, которая, впрочем, обладала небольшим сечением меди. Хотя согласно данным табл. 2 суммарный шунтирующий поток при коррекции практически не менялся, его относительное значение все-таки уменьшилось. Кажущееся противоречие между значительным улучшением распределения поля по рис. 3 и 4 и небольшим изменением шунтирующих потоков по табл. 2 в результате коррекции объясняется просто тем, что при двухслойной некорректированной обмотке большее значение имеет шунтирующий поток, возникающий в воздушном зазоре по краям сердечника. Следует также иметь в виду, что торцевые измерительные витки были сцеплены с потоком рассеяния корректирующих сторон дополнительных катушек. Данные табл. 2 указывают еще на одно значительное преимущество двухслойных обмоток, а именно — значительно меньшие магнитные потоки рассеяния лобовых частей, что способствует заметному уменьшению общей реактивной мощности индуктора.

В силу изложенного в случае плоских индукторов можно рекомендовать применять двухслойные или однослойные цепные обмотки, причем для уменьшения вредных пульсирующих магнитных потоков в воздушном зазоре применить корректирующие катушки в виде дополнительных катушек.

3. Магнитное поле цилиндрического индуктора

Цилиндрические индукторы являются другим основным перспективным типом индукторов для индукционных насосов. Это обусловлено рядом особенностей цилиндрических насосов. Конструктивно цилиндрический индуктор состоит из нескольких симметрично расположенных сердечников (рис. 1), в пазах на внутренней поверхности которых располагается обычно дисковая, реже спиральная обмотка. Внутри цилиндрического рабочего пространства нормально располагается внутренний ферромагнитный сердечник. Важным достоинством цилиндрического типа индуктора является отсутствие на активных лобовых

частях обмотки и уменьшение в связи с этим магнитных полей рассеяния и потерь.

Внутри цилиндрического индуктора в случае отсутствия внутреннего ферромагнитного сердечника магнитное поле получается слабым и к тому же в центральной части по оси индуктора перпендикулярная (рабочая) составляющая магнитной индукции равняется нулю. Согласно нашим измерениям, на внутренней поверхности сердечников индуктора при отсутствии внутреннего сердечника перпендикулярная составляющая поля ослабляется в 3—15 раз и в дальнейшем уменьшается практически пропорционально радиусу. При таких обстоятельствах давления, развиваемые таким насосом, ничтожные и этот случай практического значения не имеет.

При наличии внутреннего ферромагнитного сердечника цилиндрические индукторы развивают в общем такое же магнитное поле, как и плоские. В кольцеобразном рабочем зазоре поле неравномерно и при приближении к внутреннему сердечнику интенсивность перпендикулярного поля несколько растет. Распределение магнитной индукции по длине индуктора является достаточно

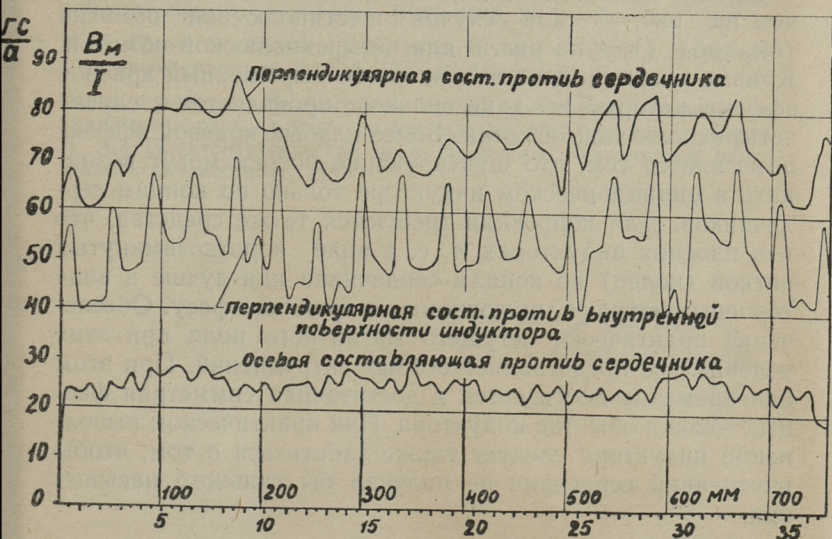


Рис. 7.

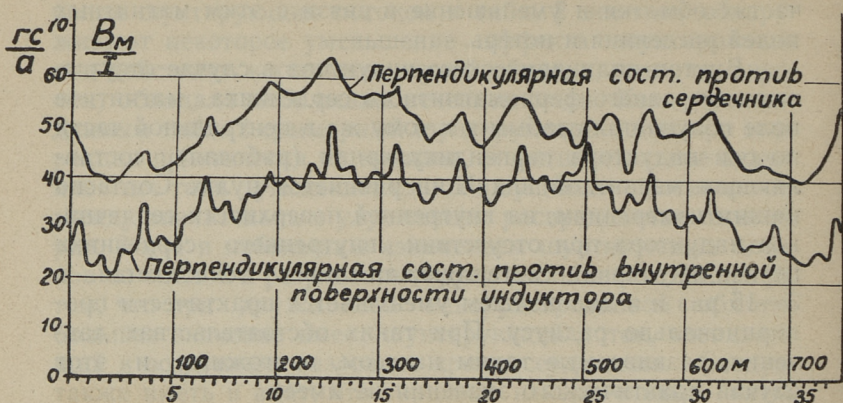


Рис. 8.

равномерным, что свидетельствует о незначительном влиянии продольного краевого эффекта. Экспериментально снятые кривые распределения перпендикулярной составляющей магнитной индукции около внешнего и внутреннего сердечников представлены на рис. 7 и 8, причем на рис. 7 для случая шестиполусной обмотки (см. табл. 1), а на рис. 8 для четырехполусной обмотки. Кривые указывают на весьма слабо выраженный краевой эффект, который все-таки сильнее проявляется в случае четырехполусной обмотки. Более слабый краевой эффект объясняется тем, что шунтирующие потоки могут возникать в цилиндрическом индукторе только по концам сердечников. Для коррекции требуются те же средства, что и в плоских индукторах, т. е. в виде короткозамкнутых витков (колец) по концам сердечника или лучше в виде торцевых катушек, включаемых в среднюю фазу. Обеспечение практически бегущего магнитного поля при этих условиях не представляет особых затруднений. При этом одновременно достигается и достаточная симметрия фазных токов в обмотке индуктора. При практическом выполнении индуктора следует также заботиться о том, чтобы внутренний сердечник не получал бы сильного насыщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **И. А. Тютин и Э. К. Янкоп**, Электромагнитные насосы для металлов. Прикладная магнитогидродинамика, Труды ин-та физики, VIII, стр. 25, Изд-во АН Латв. ССР, 1956.
2. **И. А. Тютин**, Введение в теорию индукционных насосов. Там же, стр. 49.
3. **И. А. Тютин и Э. К. Янкоп**, Электромагнитные процессы в индукционных насосах для жидкого металла. Там же, стр. 65.
4. **Л. Я. Ульманис**, К вопросу о краевых эффектах в линейных индукционных насосах. Там же, стр. 81.
5. **L. R. Blake**, Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals. Proc. I E E, v. 104, 1957, p. A, No 13, p. 49.
6. **Г. И. Штурман**, Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом. Эл-во, 1946, № 10, стр. 43.
7. **Б. Д. Садовский**, Асинхронный двигатель как машина поступательно-возвратного движения. ВЭП, 1940, № 8, стр. 10.
8. **М. Г. Резин**, Особенности электромагнитных явлений в двигателе с дуговым статором. Эл-во, 1951, № 6, стр. 25.
9. Отчет о работе: «Исследование метода уплотнения отливок и уменьшения расхода жидкого металла по предложению т. Верте Л. А.» (электротехническая часть проблемы). Таллинский политехнический институт, 1957.



А. И. Вольдек, Г. Х. Вяльмяэ, Х. В. Силламаа, Х. А. Тийсмус

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ В ИНДУКЦИОННЫХ МАШИНАХ И НАСОСАХ ДЛЯ
ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ С РАЗОМКНУТЫМ
МАГНИТОПРОВОДОМ

Издательство Таллинского Политехнического Института

*

Редактор Х. Янес
Технический редактор А. Тамм
Корректор У. Агур

Сдано в набор 7 IV 1958. Подписано к печати 28 IV 1958.
Бумага $54 \times 84 \frac{1}{16}$. Печатных листов 1,25. По формату 60×92
печатных листов 1,02. Учетно-издательских листов 1,03. Тираж 800.
Заказ № 289. МВ-03134.

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин.

Цена 75 коп.

27.9 62

Цена 75 коп.