

6  
A-53

ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ  
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК АКАДЕМИИ НАУК  
ЛАТВИЙСКОЙ ССР

---

На правах рукописи

Борис Львович Баргер

КОМПЕНСАЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО КРАЕВОГО ЭФФЕКТА В ЛИНЕЙНЫХ  
ИНДУКЦИОННЫХ МГД-МАШИНАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВЕТВЯМИ В ОБМОТКЕ.  
( 05 09 01 - электрические машины )

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Диссертация на русском языке

Рига, 1972 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ  
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК АКАДЕМИИ НАУК  
ЛАТВИЙСКОЙ ССР

---

На правах рукописи

Борис Львович Биргер

КОМПЕНСАЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО КРАЕВОГО ЭФФЕКТА В ЛИНЕЙНЫХ  
ИНДУКЦИОННЫХ МГД-МАШИНАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВЕТВЯМИ В ОБМОТКЕ.  
( 05 09 01 - электрические машины)

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Диссертация на русском языке

Рига, 1972 г.



Работа выполнена в Специальном конструкторском бюро магнитной гидродинамики Института физики Академии наук Латвийской ССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Т.К.Калнинь.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор М.Г.Резин.

Кандидат технических наук В.М.Крауя.

Ведущая организация указана в решении Объединенного Совета отделения физико-математических наук АН Латвийской ССР.

Автореферат разослан *23 мая* 1972 г.

Защита состоится *"14" февр* - 1973 г.

на заседании Объединенного Совета Отделения физико-технических наук АН Латвийской ССР.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке АН Латвийской ССР (г.Рига, ул.Коммунальная, 4).

Отзывы на автореферат диссертации просим присылать по адресу: г.Рига, ГСП, ул.Тургенева, 19, Объединенный Совет Отделения физико-технических наук.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

(М.ЗАКИС)



В настоящее время ведутся работы по внедрению индукционных МГД-машин в такие отрасли народного хозяйства, как металлургия и энергетика. Одним из основных преимуществ индукционных МГД-машин, по сравнению с другими типами МГД-машин, является возможность бесконтактной передачи усилия и энергии от индуктора к проводящему телу. Это преимущество оказывается решающим при работе с агрессивными жидкими металлами, особенно при высокой температуре. Поэтому в течение ряда лет индукционные МГД-машины являются актуальным объектом исследований. Основное внимание исследователей привлекают вопросы увеличения энергетических показателей МГД-машин (КПД), снижения стоимости изготовления обмоток на большие токи, облегчения теплового режима обмотки и т.д.

Одним из существенных способов увеличения КПД линейной индукционной МГД-машины является компенсация продольного краевого эффекта.

Практически все способы компенсации продольного краевого эффекта приводят к дополнительному перераспределению неравномерной токовой нагрузки по длине машины. Неравномерность в распределении токовой нагрузки наблюдается при подключении линейных индукционных МГД-машин к источнику питания, обеспечивающему правильный треугольник линейных напряжений, а также при наличии в фазах обмотки параллельных ветвей. Параллельные ветви образуются в обмотке индукционных МГД-машин средней и большой мощности (десятки и сотни кВа) при необходимости использования стандартных фазных напряжений.

При этом по контурам, образованным параллельными ветвями, протекают уравнивающие токи, которые существенно влияют на параметры МГД-машины. В некоторых случаях уравнивающие токи в обмотке могут быть использованы для компенсации продольного краевого эффекта.

Исследования закономерностей расположения параллельных ветвей в обмотке впервые было начато в СКБ МГД Института физики АН Латвийской ССР и частично отражено в данной диссертации.

Таким образом, основными задачами данной диссертации являются:

1. Разработка математической модели, позволяющей провести исследование электромагнитных процессов в индукторах МГД-машин при различных схемах включения катушек в фазах обмотки, проведение этих исследований и расчет параметров линейных МГД-машин с учетом продольного краевого эффекта.

2. Разработка конкретных рекомендаций по расположению параллельных ветвей в обмотке линейной индукционной МГД-машины.

3. Сравнение между собой и определение границ применения ряда известных способов компенсации продольного краевого эффекта.

Диссертация состоит из трех глав основного текста, введения, заключения и приложения.

В первой главе производится обзор литературы, в которой описывается сущность продольного краевого эффекта



в линейных индукционных МГД-машинах и способы его компенсации.

Из приведенного в главе обзора литературы следует, что в настоящее время известны десятки работ, в которых исследуется продольный краевой эффект и способы его компенсации.

Однако, неисследованным оставался вопрос о границах применения того или иного способа компенсации. Это обстоятельство часто приводило к тому, что компенсированная тем или другим способом линейная МГД-машина по основным параметрам уступала некомпенсированной. Поэтому необходима экспериментальная проверка и определение границ применения предложенных способов компенсации. Также недостаточно было исследовано количественное изменение параметров линейных МГД-машин вследствие продольного краевого эффекта в тех случаях, когда компенсация не применяется. Отсутствовали формулы, позволяющие учесть изменение электромагнитного напора и потерь активной мощности в электромагнитных расчетах линейных МГД-машин для основного рабочего режима - при питании МГД-машин от источника, обеспечивающего правильный треугольник линейных напряжений, а также при заметной реакции якоря ( $Re_m > 0$ ).

Указанные вопросы имеют большое практическое значение и поэтому исследованы в данной диссертации.

Во второй главе теоретически исследуется распределение полей в индукторах и в канале индукционных МГД-машин с неравномерной линейной токовой нагрузкой. Исследования проведены в электродинамическом приближении.

Для решения задачи в общем случае использована математическая модель индуктора, получающаяся комбинацией областей (зон) с магнитной и электрической анизотропией [1-3]. В обмоточной зоне пазы и зубцы предполагаются бесконечно тонкими, а число зубцов - бесконечно большое. Усредненная магнитная проницаемость по всем осям различна и нигде не равна  $\mu_{Fe}$  (проницаемости железа). Магнитная проницаемость в обмоточной зоне в направлении движения жидкого металла

$$\mu_x = \frac{t_z}{(\beta_z/\mu_{Fe}) + (t_z - \beta_z)/\mu_0}, \text{ а вдоль зубцов магнитопровода } \mu_z = \frac{1}{t_z} [\mu_{Fe} \cdot \beta_z + \mu_0(t_z - \beta_z)].$$

Здесь:  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума;  $\beta_z$  - ширина зубца;  $t_z$  - зубцовое деление.

Токовая нагрузка в обмоточной зоне задается в следующем виде:

$$j_y = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cdot \sin \lambda_n x, \text{ где } \lambda_n = \frac{n\pi}{L}; n = 1, 2, \dots$$
$$\beta_n = \frac{4}{L} \sum_{k=1}^N \frac{j_k}{\lambda_n} \cdot \sin \frac{\lambda_n \cdot \beta_n}{2} \cdot \sin \lambda_n [c + (k-1)t_z + \frac{\beta_n}{2}];$$

$L$  - длина индуктора,  $c$  - длина торцевых шунтирующих элементов,  $j_k$  - плотность токовой нагрузки в  $k$ -ом пазу,  $N$  - число пазов, в которых расположены катушки обмотки возбуждения.

При наличии в математической модели индуктора пяти зон [немагнитный рабочий зазор толщиной  $2\Delta$  (I-ая зона); обмоточные зоны высотой  $\delta - \Delta$  с обеих сторон немагнитного зазора (II и III зоны); ярмо магнитопровода при  $|z| > \delta$  с магнитной проницаемостью  $\mu_x = \mu_z \rightarrow \infty$  (IV и V зоны)] магнитное поле



рабочем зазоре ( $\dot{B}_{Iz}$ ) и в обмоточной зоне ( $\dot{B}_{IIx}$ ,  $\dot{B}_{IIz}$ )  
 находится как

$$\dot{B}_{Iz} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M \cdot \lambda_n}{\beta_n} \cdot \dot{A}_{In} \cdot \operatorname{ch} \beta_n z \cdot \cos \lambda_n x;$$

$$\dot{B}_{IIx} = M_x \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \dot{B}_{II n} \cdot \operatorname{sh} \lambda_n x (z - \delta) \cdot \sin \lambda_n x;$$

$$\dot{B}_{IIz} = M_z \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [-\dot{B}_{II n} \cdot x \cdot \operatorname{ch} \lambda_n x (z - \delta) \cdot \cos \lambda_n x + \frac{b_n \cos \lambda_n x}{\lambda_n}]$$

где:  $\beta_n^2 = \lambda_n^2 + i \mu \sigma \omega S$ ;  $x = \sqrt{M_x / M_z}$

$\sigma$  - электропроводность жидкого металла,  
 $S$  - скольжение,  
 $\omega$  - угловая частота питания.

$$\dot{A}_{In} = - \frac{b_n \cdot \operatorname{sh} \lambda_n x (\Delta - \delta) / \lambda_n \cdot \operatorname{sh} \beta_n \Delta}{x \left[ \frac{M_0}{M_x} \cdot \frac{x \lambda_n}{\beta} \cdot \operatorname{cth} \beta_n \Delta \cdot \operatorname{sh} \lambda_n x (\Delta - \delta) - \operatorname{ch} \lambda_n x (\Delta - \delta) \right]}$$

$$\dot{B}_{II n} = - \frac{b_n / \lambda_n}{x \left[ \frac{M_0}{M_x} \cdot \frac{x \lambda_n}{\beta} \cdot \operatorname{cth} \beta_n \Delta \cdot \operatorname{sh} \lambda_n x (\Delta - \delta) - \operatorname{ch} \lambda_n x (\Delta - \delta) \right]}$$

напряжение на  $K$ -ой катушке без учета омических потерь  
 будет:

$$\dot{U}_K = i W_K \frac{\omega}{(\delta - \Delta) \cdot b_n} \int_{c + (\kappa - 1)t_z}^{c + (\kappa - 1)t_z + l_n} \int_{\Delta}^{\delta} \dot{\Phi}_{IIcp}(x, z) dx \cdot dz$$

где:  $W_K$  - число витков в катушке;  $\dot{\Phi}_{IIcp}$  - потокосцепление  
 катушки, имеющего текущие координаты  $x$  и  $z$ .

$$\dot{\Phi}_{IIcp}(x, z) = \int_0^x \dot{B}_{IIz}(x, z) dx.$$

Каждой конкретной схемой включения катушек в фазах  
 обмотки задается связь между напряжениями на катушках и  
 токах в них.

В § 2 и § 3 для последовательной схемы соединения  
 катушек в фазах обмотки при ряде общепринятых допущений  
 определены коэффициенты изменения давления и потерь актив-  
 ной мощности в канале МГД-машины вследствие продольного  
 краевого эффекта в некомпенсированной машине [6]. В § 2  
 расчет производился при заданном треугольнике линейных  
 напряжений без учета реакции якоря, в § 3 - при заданной  
 звезде фазных токов с учетом реакции якоря.

Выражения для коэффициентов получены в виде, позволяю-  
 щем использовать их при инженерных расчетах линейных МГД-  
 машин.

Так, при заданном треугольнике линейных напряжений  
 получены следующие выражения:

$$K_{ог} = \frac{1}{S} \left[ |\dot{I}'_1|^2 (s + Y' + sY') - |\dot{I}'_2|^2 (2 + 3Y' - s - sY') + 2Y'(1-s) |\dot{I}'_1| |\dot{I}'_2| \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right. \\
 - \frac{1}{18} (1-s) |\dot{I}'_0|^2 + \frac{2}{9} Y' |\dot{I}'_0| |\dot{I}'_1| \cos(\varphi_0 - \varphi_1) - \frac{2}{9} Y' |\dot{I}'_0| |\dot{I}'_2| \cos(\varphi_0 - \varphi_2) \\
 K_{он} = \frac{1}{S^2} \left\{ |\dot{I}'_1|^2 [s^2 + 2sY' + (1 - Y' + Y's)^2 + \frac{\pi^2}{3} \rho^2 Y'^2] + |\dot{I}'_2|^2 [(2-s)^2 + \right. \\
 \left. + 2(2-s)Y' + (1 - Y' - Y's)^2 + \frac{\pi^2}{3} \rho^2 Y'^2] + 2[1 - 2Y' - Y'^2(1-s)^2 - \frac{\pi^2}{3} \rho^2 Y'^2] \cdot \right. \\
 \left. |\dot{I}'_1| |\dot{I}'_2| \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{54} [1 + 3(1-s)^2] |\dot{I}'_0|^2 + \frac{2}{9} [1 - 2(1-s)] |\dot{I}'_1| |\dot{I}'_0| \cos(\varphi_1 - \varphi_0) \right. \\
 \left. + \frac{2}{9} [1 + 2(1-s)] |\dot{I}'_2| |\dot{I}'_0| \cos(\varphi_2 - \varphi_0) \right.$$



Здесь:  $K_{од}$  и  $K_{оп}$  - коэффициенты изменения давления и потерь в канале МГД-машины вследствие продольного краевого эффекта соответственно.

$S$  - скольжение.  $Y'$  - относительное торцевое шунтирование,  $P$  - число пар полюсов.

$\dot{I}_1 e^{i\varphi_1}$ ;  $\dot{I}_2 e^{i\varphi_2}$ ;  $\dot{I}_0 e^{i\varphi_0}$  - комплексные амплитуды токов прямой, обратной и нулевой последовательностей [6].

Из анализа полученных выражений следует, что даже при отсутствии торцевого шунтирования в машине возникают дополнительные потери, вызванные пульсациями тока в жидком металле.

При взаимодействии с бегущим магнитным полем эти пульсации на длине машины  $2p\tau$  ( $\tau$  - полюсное деление обмотки) давления не создают, а лишь приводят к неравномерному распределению давления по длине машины. Для ликвидации дополнительных потерь в МГД-машине нужно стремиться не только к выравниванию распределения магнитного поля в зазоре, но также и к выравниванию распределения электрического поля в жидком металле.

С ростом торцевого шунтирования при фиксированном напряжении на обмотках машины растет суммарное давление, развиваемое насосом, однако, потери во вторичной цепи

увеличиваются еще быстрее. Поэтому при компенсации продольного краевого эффекта методами, основанными на выравнивании поля в зазоре, КПД машины растет, а напор насоса может уменьшаться. Для дальнейшего увеличения КПД нужно выравнивать распределение электрического поля в зазоре. С ростом реакции якоря и числа пар полюсов машины коэффициенты изменения давления и потерь во вторичной цепи линейной МГД-машины уменьшаются и стремятся к 1.

Расчет уравнивающих токов, протекающих по катушкам обмотки при наличии в фазах обмотки параллельных ветвей и их влияния на параметры линейной МГД-машины произведен в § 4 главы II. Из полученных выражений [4] для однофазной машины при наличии двух катушек в фазе, следует, что при переходе от последовательной схемы включения катушек в фазах к параллельной при условии, что ток в катушках для схемы с последовательным включением равен половине тока в линии для схемы с параллельным включением, развиваемый электромагнитный напор в жидком металле без учета реакции якоря уменьшится примерно в 2,5 раза, а потери в жидком металле - примерно в 4 раза. То есть отношение давления на единицу активной мощности, передаваемой в жидкий металл, возрастает. Существенно уменьшается и магнитный поток в сердечнике.

Расчетное и экспериментальное распределение по длине машины потока в сердечнике показано на рис. 1 и 2 для различных схем соединения катушек в фазах обмотки.

Таким образом в машине, в которой катушки обмотки охватывают ярмо магнитопровода и включены встречно-параллельно, продольный краевой эффект компенсируется в первичной и во



вторичной цепи МГД-машины. Уменьшение потока в яме приводит к уменьшению сечения сердечника и, следовательно, к уменьшению диаметра катушек (в цилиндрических машинах). При этом уменьшается как расход меди на катушки обмотки, так и потери в них.

Однако, в результате протекания по катушкам обмотки уравнительных токов, потери в индукторе возрастают. Следовательно, способ компенсации, основанный на использовании параллельных ветвей в обмотке, может быть эффективным в таких МГД-машинах, где потери в обмотке составляют небольшую часть общих потерь. Следует отметить, что рассматриваемый способ компенсации, в отличие от ряда известных, чрезвычайно прост в применении.

Таким образом, в результате теоретических исследований, приведенных во второй главе диссертации, получены выражения, позволяющие количественно учесть продольный краевой эффект в линейной индукционной МГД-машине в тех случаях, когда компенсация продольного краевого эффекта не применяется.

Кроме того, были исследованы электромагнитные процессы и определены параметры линейных МГД-машин при некоторых схемах компенсации продольного краевого эффекта. Экспериментальная проверка полученных результатов и исследование линейных индукционных МГД-машин при различных более сложных схемах включения катушек в фазах обмотки приведены в главе III.

В § I главы III исследуется распределение магнитных полей в цилиндрических и плосколинейных МГД-машинах при различном расположении параллельных ветвей в обмотке по длине машины.

Проведенные испытания показали, что при одном и том же числе параллельных ветвей в фазе обмотки ( $\alpha$ ) и числе пазов на полюс и фазу ( $\rho$ ), изменяя расположение параллельных ветвей по длине машины, можно существенно менять распределение поля в зазоре и в яме машины, а, следовательно, и параметры машины. Испытания проводились на плоских и цилиндрических насосах. Экспериментальная установка описана в [6].

Измерение распределения полей производилось при различных значениях  $\alpha$  и  $\rho$ . В качестве примера схемы соединения катушек в одной фазе цилиндрического насоса показаны на рис. 3. Эти схемы отличаются различным расположением параллельных ветвей по длине насоса. На рис. 4 показано распределение полей в зазоре и в сердечнике машины для указанных схем соединения обмоток. Каждая кривая обозначена двойным номером, где первая цифра - порядковый номер схемы включения катушек в фазах обмотки по рис. 3, а вторая - номер измерительной рамки. Измерительная рамка № 1 измеряет поле в сердечнике, рамка № 2 интегрирует магнитный поток в рабочем зазоре на участке длиной  $l$ , а рамка № 3 измеряет поле в "точке" в рабочем зазоре. Все три рамки наклеивались на втулку, которая с помощью протяжного механизма равномерно перемещалась вдоль по зазору. На рис. 5 показаны вольтамперные характеристики для ряда схем соединения катушек, приведенных на рис. 3.



Из анализа приведенных кривых были сделаны следующие рекомендации по составлению схем включения катушек в фазах линейных индукционных МГД-машин цилиндрического типа или плосколинейных с обмоткой через ядро [8, 10]:

а) при наличии в обмотке нескольких параллельных ветвей ( $q > 1$ ) и при числе пазов на полюс и фазу  $q \geq 2$  для наиболее полного использования магнитной системы необходимо катушки одной фазы, расположенные в соседних пазах, включать только последовательно. При параллельном включении катушек, расположенных в соседних пазах (схема № I рис.3), вокруг каждого четного зубца индуктора образуется замкнутый электрический контур, "запирающий" магнитный поток в этом зубце. Уравнительные токи, протекающие в этом контуре, соизмеримы с полным током в катушке. С ростом напряжения на обмотке насоса (кривые б на рис.4) распределение поля по длине насоса не изменяется. "Запирание" части зубцов приводит к заметному снижению вольт-амперных характеристик машины (рис 5). Все это приводит к резкому снижению выходной мощности и КПД индукционной МГД-машины.

б) Для компенсации неравномерности распределения поля в рабочем зазоре и в сердечнике (ядре) машины, вызванной разомкнутостью магнитной системы, параллельные ветви в обмотке следует образовывать, соединяя катушки (или группы катушек при  $q \geq 2$ ), расположенные на расстоянии полюсного деления  $\tau$ . При этом в обмотке образуется электрический фильтр "запирающий" пульсирующую составляющую поля.

Аналогичные опыты на плосколинейных машинах с двухслойной обмоткой показали, что наиболее равномерное распределение магнитного поля по длине также имеет место при параллельном включении соседних по фазе обмоток (при  $q = 1$ ). Причем, электрические контуры в обмотке одного индуктора должны быть сдвинуты относительно контуров другого индуктора на одно полюсное деление.

Таким образом, предложен новый способ компенсации продольного краевого эффекта [8, 10], основанный на использовании электрических контуров, получающихся при наличии в ветвях обмотки параллельных ветвей. Вместо катушек обмотки как в плоских, так и в цилиндрических машинах, могут быть использованы электрические проводники, охватывающие участки ядра (сердечника) МГД-машины или зубцы магнитопровода на определенных участках.

Сравнение предложенного способа компенсации с известными проводилось в режиме "холостого хода", на жидком металле и его имитаторах.

При первых же экспериментах на цилиндрической машине было констатировано, что увеличение силы на единицу потребляемой мощности при применении того или иного способа компенсации продольного краевого эффекта зависит не только от распределения магнитного поля и токов, но и от величины реакции якоря ( $\epsilon$ ) и соотношения потерь в обмотке и полной потребляемой мощности ( $P'$ ).

При применении какой-либо компенсации происходит перераспределение мощности: потери от пульсирующих и обратно



бегущих полей во вторичной цепи уменьшаются, зато появляются дополнительные потери в компенсирующих элементах. Ощутимый положительный эффект от компенсации был получен при сравнительно малых потерях в обмотке и компенсирующих элементах ( $P' \leq 0,3$ ) при значениях  $0,1 < \varepsilon < 4$ .

При малых значениях  $\varepsilon$  ( $\varepsilon < 0,1$ ) возрастает относительные потери в обмотке ( $P' > 0,3$ ). Поэтому компенсация рассмотренными методами не дала положительного эффекта.

Таким образом, компенсация продольного краевого эффекта известными методами компенсации (в том числе и параллельными ветвями в обмотке) приводит к увеличению КПД в диапазоне  $0,1 < \varepsilon < 4$  при  $P' \leq 0,3$ . При других сочетаниях  $\varepsilon$  и  $P'$  увеличения КПД при компенсации не происходит. Тем не менее, компенсация продольного краевого эффекта может быть применена для выравнивания поля, уменьшения полного потока в ядре, выравнивания распределения температуры в канале и т.д.

Жидкометаллические испытания, проведенные на цилиндрических насосах типа ЭНЦ-31 и на плосколинейных насосах типа ЭНЦ-26, показали, что компенсация продольного краевого эффекта параллельными ветвями в обмотке является весьма эффективной.

На рис. 6 показаны  $P$  и  $Q$  - характеристики насоса ЭНЦ-31 при различных схемах соединения катушек и фиксированном гидравлическом сопротивлении контура. В этом насосе применена компенсация продольного краевого эффекта параллельными ветвями в обмотке.

Увеличение выходной гидравлической мощности насоса при применении компенсации явилось следствием ликвидации в сердечнике насоса пульсирующего потока, пересыщавшего сердечник.

В § 3 производилась экспериментальная проверка расчетных коэффициентов, полученных в главе II. Разхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 + 15 %.

Таким образом, коэффициенты изменения напора и потерь активной мощности вследствие продольного краевого эффекта могут быть использованы в электромагнитном расчете линейных индукционных МД-машин в тех случаях, когда компенсация продольного краевого эффекта не применяется.



I. Основные результаты работы.

1. Разработана математическая модель, позволяющая сравнительно просто связать первичную и вторичную цепи индукционных МГД-машин и определить параметры машины при различных схемах соединения катушек в фазах обмотки.

2. Для основных схем соединения катушек обмоток линейных МГД-машин (звезда и треугольник) получены коэффициенты, позволяющие учесть изменение напора и потерь активной мощности вследствие продольного краевого эффекта при  $Re_m < 1$ , характерного для ряда МГД-машин, предназначенных для транспортировки  $Hg, Ga, Pb$  и т.д. Коэффициенты получены для основного режима работы промышленных МГД-машин - питания от источника, обеспечивающего правильный треугольник линейных напряжений. При произвольных значениях  $Re_m$  получены те же коэффициенты в предположении правильной звезды фазных токов.

3. Теоретически и экспериментально исследовано влияние различного расположения параллельных ветвей в обмотке по длине машины на параметры последней. Проведенные исследования выявили закономерности в построении схем соединения катушек, при которых полностью используется магнитная система машины, а в некоторых случаях и компенсируется продольный краевой эффект.

4. В результате экспериментального исследования методов компенсации продольного краевого эффекта установлено, что важными критериями возможности применения того или иного



способа компенсации с целью увеличения КПД машины являются параметры  $\epsilon$  и  $\rho'$  - отношение потерь в индукторе МГД-машины к полной потребляемой мощности.

5. Экспериментально определены в зависимости от указанных критериев области применения ряда известных способов автокомпенсации продольного краевого эффекта в цилиндрических машинах. Установлено, что увеличение КПД может быть достигнуто при  $0,1 < \epsilon < 4$  и  $\rho' \leq 0,3$ . При других значениях указанных параметров некомпенсированная машина по КПД превосходит компенсированную.

6. Показано, что в ряде практических случаев применение компенсации продольного краевого эффекта параллельными ветвями в обмотке с целью повышения КПД и облегчения магнитной системы машины является наиболее простым и достаточно эффективным решением.

7. Полученные в диссертации результаты не исчерпывают все затронутые вопросы. Целесообразно провести экспериментальные и теоретические исследования по связи продольного эффекта с поперечным и уточнить влияние этих эффектов на параметры машины.

II. Практическое применение результатов диссертации.

I. Предложенные схемы соединения катушек в фазах линейных электромагнитных насосов применены в ряде электромагнитных насосов, изготовленных в СКБ МГД.



Параметры и количество изготовленных по указанным схемам насосов приведены в приложении к диссертации.

Экономия от применения разработанных схем составила ~155 тыс. руб. (по данным СКБ МГД).

2. Часть из приведенных в приложении электромагнитных насосов используется в качестве основных элементов в металлургических установках. Высокие технико-экономические показатели насосов, в которых использованы разработанные в диссертации схемы, а также новые конструктивные решения позволили установкам для очистки жидких металлов выдержать конкуренцию с существующими установками.

Описание некоторых установок очистки жидких металлов, разработанных в СКБ МГД при непосредственном участии автора, приведено в приложении к диссертации.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Биргер Б.Л., Вилнитис А.Я., Горовиц В.С.  
"Расчет поля в обмоточной зоне плосколинейных индукционных МГД-машин с учетом конечной магнитной проницаемости железа".  
Магнитная гидродинамика, 1968, № 4, стр. 109.
2. Биргер Б.Л., Вилнитис А.Я., Горовиц В.С.  
"Расчет в плосколинейных индукционных МГД-машинах с учетом конечной толщины обмоточной зоны и магнитной проницаемости железа".  
Магнитная гидродинамика, 1969, № 1, стр. 105.
3. Биргер Б.Л., Горовиц В.С., Калнинь Т.К., Полманис Я.Э.,  
Математическая модель индукционных МГД-машин с разделенным магнитопроводом.  
Магнитная гидродинамика, 1969, № 4, стр. 78.
4. Б.Л.Биргер "Уравнительные токи в обмотке индукционной МГД-машины при наличии параллельных ветвей в фазе".  
Магнитная гидродинамика, № 1, 1972.
5. Б.Л.Биргер, В.С.Горовиц, В.М.Филифоров, Б.Н.Украинцев, Я.Р.Пьит.  
"Некоторые вопросы проектирования плосколинейных индукционных насосов".  
В сб. техническая электромагнитная гидродинамика, Донецк, 1970 г.
6. Биргер Б.Л., Горовиц В.С., Ципий А.В.  
Анализ работы линейной индукционной МГД-машины при питании её симметричной системой линейных напряжений.  
В сб. материалов к IУ Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам, Таллин, 1970 г.



7. Биргер Б.Л., Головиц В.С., Украинцев Б.Н., Фолифоров В.М. "Постановка задачи при проектировании плоскоструйных индукционных МГД-устройств".

Сб.техническая электромагнитная гидродинамика I (3). Труды ДОНИИЧЕРМЕТ, Донецк, 1968.

8. Биргер Б.Л., Головиц В.С. и другие.

Авторское свидетельство № 299005. "Схема соединения двухобойных обмоток двухиндукторных индукционных МГД-машин с разомкнутым магнитопроводом".

9. Биргер Б.Л., Фолифоров В.М., Сиротенко В.Г. и др.

Авторское свидетельство № 321319. "Устройство для очистки и транспортировки электропроводящей жидкости".

10. Биргер Б.Л., Головиц В.С., Вилнитис А.Я. и др.

Авторское свидетельство № 338173. "Схема включения катушек обмоток индукционных линейных МГД-машин с разомкнутым магнитопроводом".

11. А.А.Белёский, Б.Л.Биргер, А.Я. Вилнитис и др.

Авторское свидетельство № 293397. "Устройство для перемешивания и транспортирования токопроводящих сред".

12. Б.Л.Биргер, В.М.Фолифоров, Б.Н.Украинцев и др.

Авторское свидетельство № 321320. "Устройство для перемешивания и транспортирования токопроводящих сред".

Результаты работы докладывались на IV Всесоюзном совещании по технической электромагнитной гидродинамике (гор. Донецк, 1969 г.) и на IV Таллинском совещании по электромагнитным расходомерам (г.Таллин, 1971 г.).

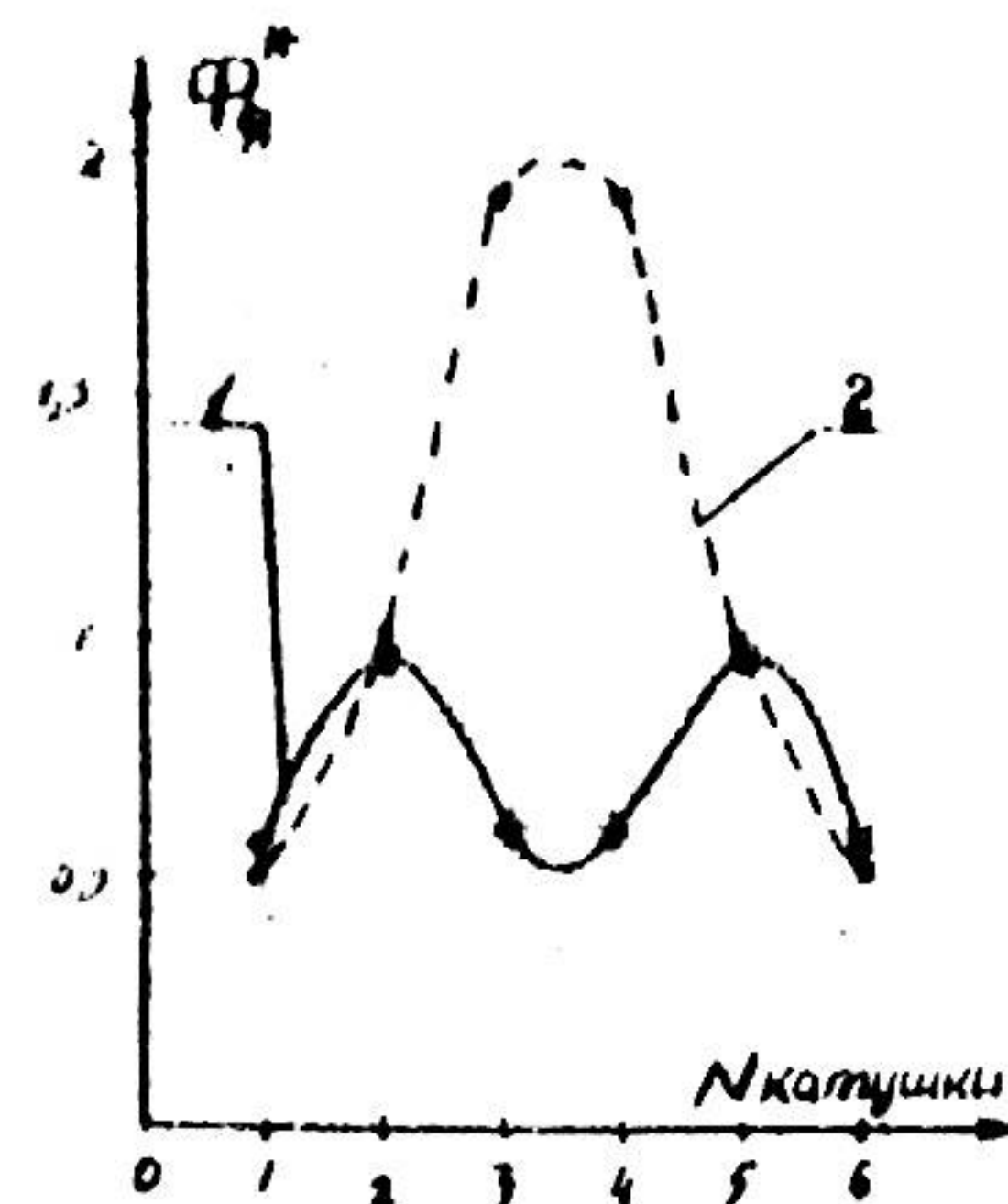


Рис.1.

Расчетное распределение магнитных потоков в ядре машины.

1 - при параллельном включении катушек;

2 - при последовательном.

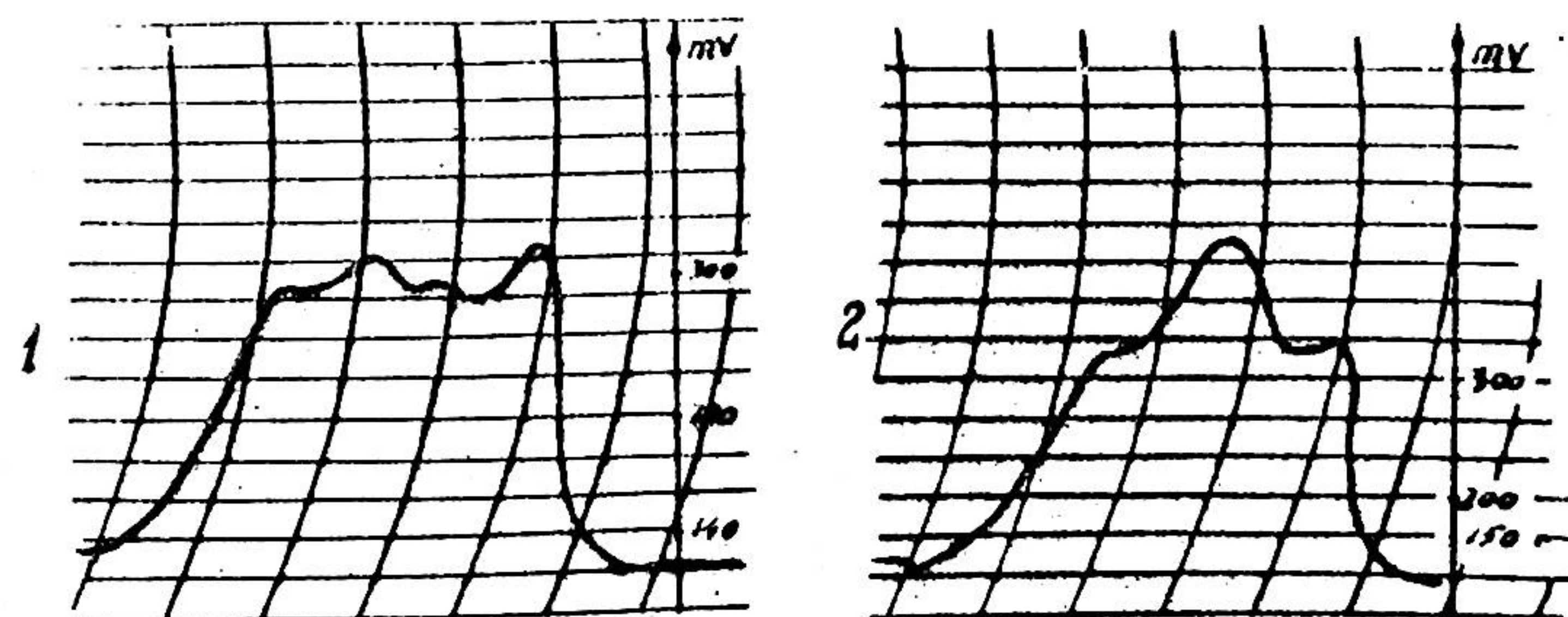


Рис.2.

Экспериментально измеренное распределение магнитного потока в ядре машины.

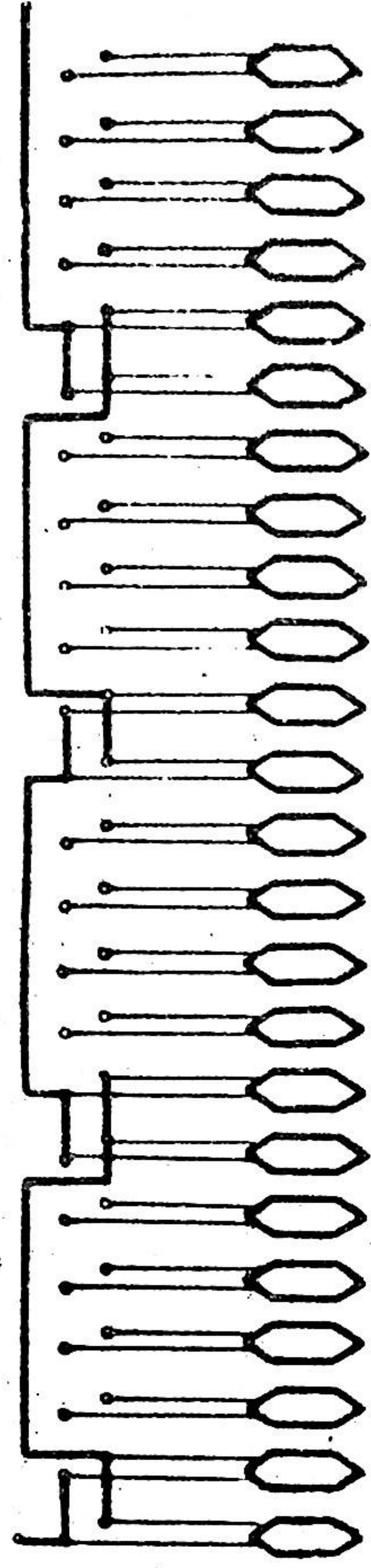
1 - при параллельном включении катушек;

2 - при последовательном.

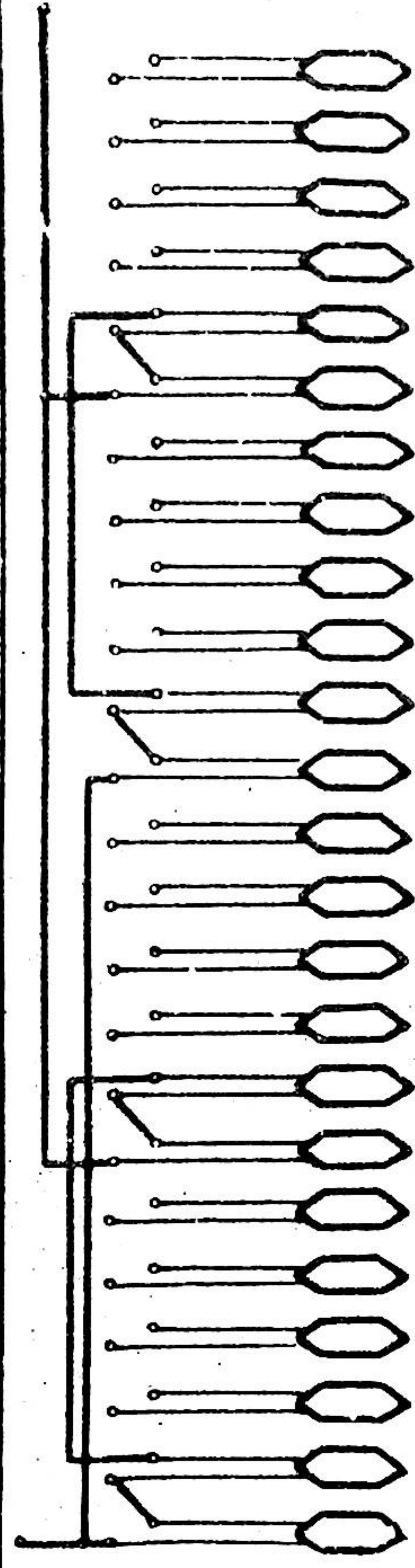


Схема соединения катушек в фазе насоса

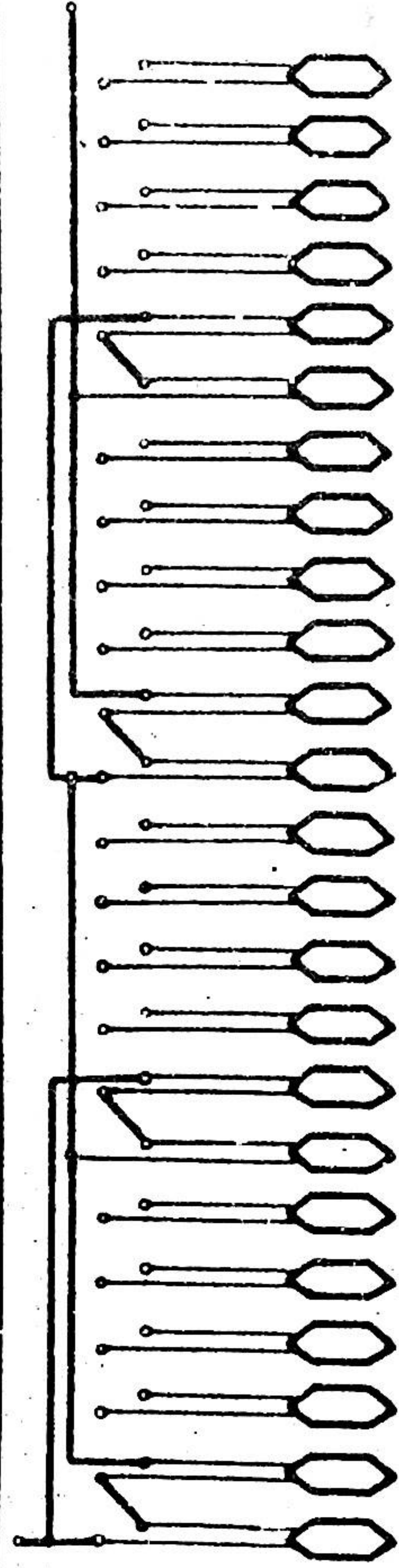
№ п/п



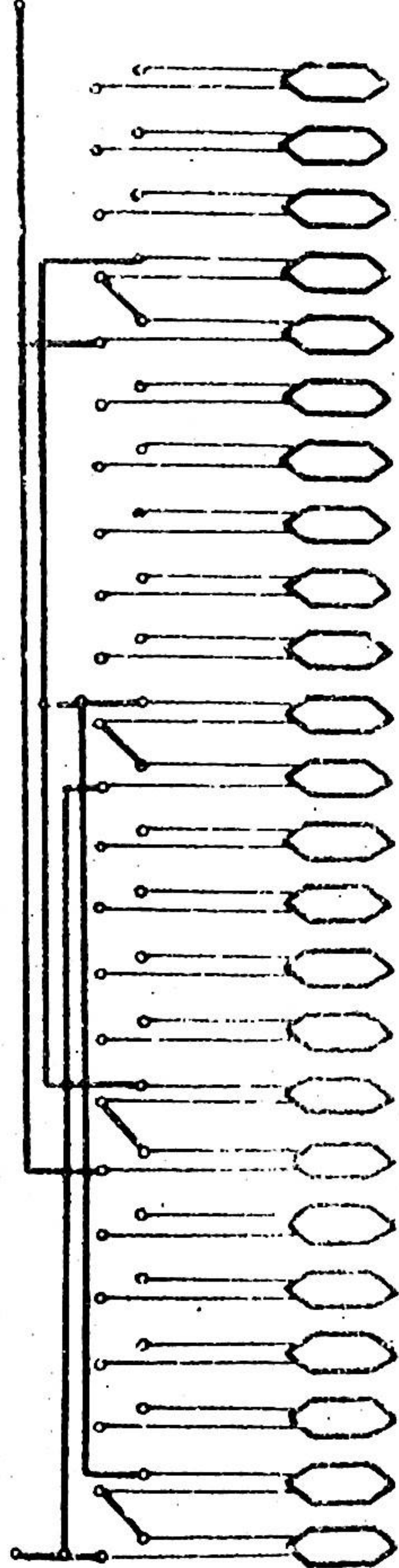
№ 1



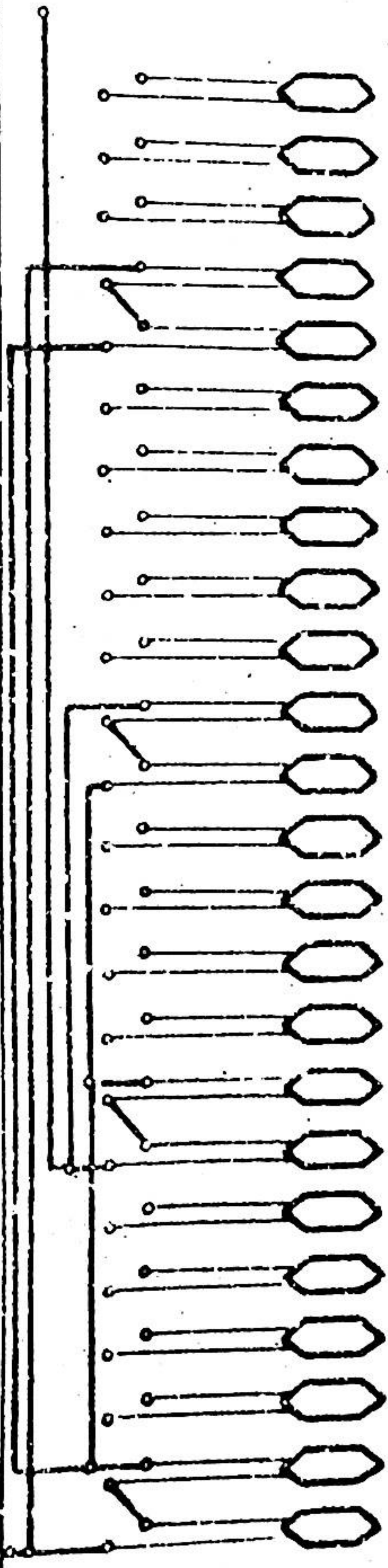
№ 2



№ 3



№ 4



№ 5

Рис. 3.

Схема соединения катушек в фазе цилиндрического насоса.