

Изобретение относится к электротехнической промышленности и может быть использовано в конструкциях электрических индукционных устройств, например, трансформаторов.

Известно устройство для увеличения магнитного потока в трансформаторе, заключающийся в увеличении числа пластин сердечника или же увеличении намагничивающего тока, или же увеличении числа витков в намагничивающей обмотке [Алексеев Г. В., Ашрягов А. К., Фрид Е. С. Испытание силовых и мощных трансформаторов и автотрансформаторов. - М., Госэнергоиздат, 1962].

Однако это устройство требует как дополнительный расход материала (в случае увеличения количества пластин сердечника или увеличения числа витков в обмотке), так и увеличение намагничивающего тока, а, следовательно, и потребляемой энергии.

Известно устройство понижения неоднородности магнитного потока, который достигается за счет упорядочения расположения зазоров, имеющих в магнитопроводе [Авт. св. СССР №1511776, кл. Н 01 F 27/24, опублик. 1989]. Упорядоченное распределение стыков пластин по длине каждого из стержней сердечника приводит к уменьшению неоднородности перемангничивания сердечника и, тем самым, к снижению потерь на вихревые токи и гистерезис. Оно и выбрано в качестве прототипа.

Однако данное техническое решение не использует локальное увеличение индукции в пластинах над воздушным зазором, и тем самым не позволяет добиться увеличения магнитного потока в сердечнике (или снижения намагничивающего тока).

В основу изобретения поставлена задача усиления магнитного потока в сердечниках и понижения намагничивающего тока в обмотке путем использования энергии магнитных полей рассеивания, что позволяет сократить расход материала сердечника и обмоток, а также повысить эксплуатационные характеристики электрических индукционных устройств.

Признаки заявляемого технического решения, общие с прототипом: сборка магнитопровода и его намагничивание во внешних полях.

Признаки, отличные от прототипа:

- использование при намагничивании магнитопровода энергии магнитных полей рассеивания, которые создаются:

- системой ферромагнитных пластинок с воздушными зазорами;
- целыми пластинами с канавками (царапинами);
- пластинами, где имеет место чередование участков из магнитомягкого материала с высокой и низкой магнитными проницаемостями;
- набором из нескольких слоев подмагничивающих систем;
- немагнитными зазорами, образующимися между витками ленты из магнитомягкого материала, намотанной на сердечник;
- наличие смещения источников магнитных полей рассеивания друг относительно друга в подмагничивающих системах.

Магнитные поля рассеивания  $H_s$  около воздушных зазоров, которые образуются при сборке сердечников трансформаторов в местах стыка пластин, в первом приближении являются плоскими полями (фиг. 1). Вектор напряженности таких полей  $H_s$  имеет только две компоненты:  $H_x$  (ось X совпадает с направлением внешнего поля  $H_e$  и направлена по длине пластины - фиг. 2) и  $H_y$  (ось Y нормальна к поверхностям пластин, образующих магнитопровод). Общеизвестно, что при переходе из одной среды с магнитной проницаемостью  $\mu_1$  в другую с проницаемостью  $\mu_2$  ( $\mu_2 > \mu_1$ ) нормальная компонента поля рассеивания термит разрыв, уменьшаясь в  $\mu_1/\mu_2$  раз, продольная же составляющая поля рассеивания  $H_x$  свое значение при этом не изменяет. Поэтому при переходе из воздуха в ферромагнетик  $H_y$  уменьшается приблизительно в 1000 раз (для электрической стали (ЭС) и не влияет на процессы намагничивания в сердечнике. Анализируя зависимость продольной компоненты от координаты  $H_x(x)$ , мы обнаруживаем две характерные области, в которых  $H_x$  принимает значения с противоположными знаками. В одной из них, величиной в несколько миллиметров,  $H_x > 0$ , т. е. направлена вдоль внешнего намагничивающего поля  $H_e$  ( $H_x = H_x^+$ ); в другой области, значительно превышающей первую,  $H_x < 0$ , т. е. направлена против внешнего поля  $H_e$  ( $H_x = H_x^-$ ). Возникновение воздушного зазора в одном из слоев сердечника приводит к тому, что выше- и нижележащие пластины будут подвержены влиянию не только однородного внешнего намагничивающего поля  $H_e$ , но и крайне неоднородного магнитного поля рассеивания  $H_s$ , продольная компонента  $H_x$  которого локально подмагничивает пластины ЭС в тех областях над зазором, где  $H_x = H_x^+$  и затрудняет процессы намагничивания ЭС в тех зонах (областях), где  $H_x = H_x^-$ . Из-за того, что область над зазором, в которой  $H_x$  направлена против поля  $H_e$  значительно превышает размеры областей, где  $H_x$  совпадает по направлению с внешним полем, появление воздушного зазора в одном из слоев сердечника приводит к ухудшению магнитных характеристик верх- и нижележащих пластин, что является общеизвестным фактом.

Изобретение осуществляют следующим образом: 1 пластину ЭС разрезают на отдельные пластинки, затем пластинки приклеивают на стеклотекстолит с фиксацией зазора между ними (фиг. 3). Размер пластинок по направлению прокатки НП, а, следовательно, и расстояние между зазорами сопоставим с величиной области, в которой продольная компонента  $H_x$  совпадает по направлению с внешним полем  $H_e$ . При намагничивании такой системы внешним полем она порождает магнитные поля рассеивания, которые при соблюдении указанного правила выбора размера пластинок будут иметь топологию продольной составляющей, представленную на фиг. 4. Из фиг. 4 видно, что  $H_x$  в этом случае не будет принимать отрицательных значений, либо

2. На целой пластине стали делают канавки до 1/2 толщины, которые расположены поперек большей поверхности пластины, либо

3. На целой пластине стали создают области с магнитной проницаемостью, отличной от основной части пластины (например, лазерной обработкой);

полученную подмагничивающую систему помещают вблизи поверхности сердечника и намагничивают внешними полями одновременно с последним, либо

4. Сердечник обвивают лентой из магнитомягкого материала, так, что между витками ленты остаются немагнитные зазоры, сердечник и лента совместно намагничиваются во внешних полях.

При помещении во внешнее магнитное поле  $H_e$  подмагничивающей системы и пакетов пластин ЭС последние будут подвержены действию не только внешнего поля  $H_e$ , но и поля рассеивания  $H$  одновременно. Поскольку продольная компонента  $H$  поля рассеивания подмагничивающей системы всюду положительна (фиг. 4), то при совместном перемагничивании подмагничивающей системы и пакета пластин ЭС, напряженность внешнего поля  $H_e$  для пакета, увеличивается на величину продольной компоненты  $H_x$ .

Примеры конкретного выполнения:

Собирают магнитопровод из пластин ЭС в форме квадрата со стороной 280 мм. На магнитопровод надевают катушки, на которые затем навивают обмотку. Намагничивание пластин внешним полем осуществляют путем пропускания по обмотке катушки постоянного или переменного тока  $I_n$ . Измерительная обмотка навита непосредственно на пластины ЭС. Схема одного из плечей магнитопровода приведена на фиг. 5. Измерялась зависимость индукции в пластинах  $B$  от величины намагничивающего тока  $I_n$ , т. е. напряженности внешнего магнитного поля  $H_e$ . Затем к нижней (фиг. 6), а также к нижней и верхней сторонам сердечника (фиг. 7) помещалась подмагничивающая система и измерения  $B_2=f(I)$  повторялись. В ситуации, показанной на фиг. 7, воздушные зазоры в верхней пластине смещены относительно зазоров в нижней пластине на  $1/2$  расстояния между зазорами. На фиг. 5-7 цифрами обозначено следующее:

1 - намагничивающая обмотка;

2 - измерительная обмотка;

3 - пластины ЭС;

4 - подмагничивающая система.

Пример 1 (увеличение магнитного потока).

Результаты измерения в постоянных полях представлена в табл. 1, в переменных в табл. 2. Из табл. 1 и 2 видно, что увеличение индукции в сердечнике  $\Delta B$  зависимости от величины внешнего намагничивающего поля  $H_e$  и имеет тенденцию к снижению при росте напряженности внешнего поля. Следует отметить, что для изотропной стали, а также для пластин ЭС, вырезанных под углом в  $90^\circ$  к направлению прокатки (НП) увеличение магнитного потока в материале при использовании перемагничивающих систем значительно, чем для пластин, вырезанных вдоль НП.

Пример 2 (снижение намагничивающего тока в обмотке). Полученный в примере 1 результат означает также снижение намагничивающего тока  $I_n$  (внешнего поля  $H_e$ ), необходимого для достижения требуемого значения индукции в сердечнике.

При намагничивании 3-х пластин ЭС марки 3408 индукция  $B_1=1,50$  Тл достигается при значении внешнего поля 70 А/м (см. табл. 1). При этом же внешнем поле, т. е. при той же силе тока в намагничивающей обмотке, в присутствии подмагничивающей системы индукция  $B_2=1,62$  Тл. Это означает, что  $B=1,50$  Тл достигается при меньшем значении намагничивающего тока. Следовательно, совместное намагничивание сердечника и подмагничивающей системы приводит к снижению намагничивающего тока в обмотке, требуемого для достижения определенного значения индукции в магнитопроводе.

В табл. 3 и 4 приведены данные об уменьшении соответственно постоянного и переменного намагничивающих токов.

Как следует из табл. 3 уменьшение намагничивающего тока, необходимого для достижения рабочих значений индукции в пакете из трех пластин ЭС марки 3406 при использовании подмагничивающей системы составляет 21% для  $B=1,50$  Тл и 45% для  $B=1,70$  Тл. Значительное уменьшение намагничивающего тока (на 68%) наблюдается при увеличении индукции до 1,8 Тл.

Изобретение позволяет усилить магнитный поток в сердечнике в среднем на 4-6% при неизменном значении намагничивающего тока в обмотке, а, следовательно, и напряженности внешнего поля. Практическая значимость данного изобретения заключается в возможности использования в качестве материала для подмагничивающей системы на целых пластин ЭС, а отдельных кусочков (отходов производства), образовавшихся в результате порезки листа стали на пластины требуемых размеров.

Полученный результат - усиление магнитного потока означает также снижение величины намагничивающего тока, необходимого для достижения требуемого значения индукции в магнитопроводе. Уменьшение намагничивающего тока составляет в среднем 20-50%, что позволяет перевести эксплуатацию индукционного устройства, такого как трансформатор, в меньший токовый диапазон, либо уменьшить число витков в намагничивающей обмотке.

Таблица 1

Увеличение индукции в магнитопроводе, находящемся во внешнем постоянном поле при использовании подмагничивающей системы

Материал магнито- провода	$H_{\text{внеш.}}$ А/м	В, Тл			$\Delta B = B_2 - B_1$ Тл		$\Delta B / B_1$ , %	
		В <sub>1</sub> без подмаг- ничив. систем	В <sub>2</sub> с подмагн. сис- темой		под- магн. с одн. сто- роны	подмагн.	С одн. стороны	С 2-х сторон
			С одной стороны	С 2-х сторон				
ЭС 3406 1 пласт. $\varphi = 0^\circ$	50	1,49	1,59	1,59	0,10	0,10	6,7	6,7
	100	1,66	1,74	1,74	0,08	0,08	4,8	4,8
	150	1,71	1,77	1,77	0,06	0,06	3,5	3,5
	500	1,79	1,87	1,87	0,08	0,08	4,5	4,5
	1000	1,82	1,92	1,92	0,10	0,10	5,5	5,5
	2000	1,89	1,96	1,96	0,07	0,07	3,7	3,7
ЭС 3406 3 пласт. $\varphi = 0^\circ$	100	1,62	1,66	1,66	0,04	0,04	2,5	2,5
	150	1,69	1,76	1,76	0,07	0,07	4,1	4,1
	500	1,80	1,87	1,87	0,07	0,07	3,9	3,9
	1000	1,85	1,92	1,95	0,07	0,10	3,8	5,4
	2000		1,95	1,99	0,05	0,09	2,6	4,7
ЭС 3408 1 пласт. $\varphi = 0^\circ$	50	1,55	1,60	1,68	0,05	0,13	3,2	8,4
	70	1,64	1,72	1,77	0,08	0,13	4,9	7,9
	100	1,70	1,78	1,82	0,08	0,12	4,7	7,1
	150	1,75	1,82	1,85	0,07	0,10	4,0	5,7
	500	1,84	1,92	1,95	0,08	0,11	4,3	6,0
	1000	1,89	1,97	1,97	0,08	0,08	4,2	4,2
	2000	1,94	1,98	1,98	0,04	0,04	2,1	2,1
ЭС 3408 3 пласт. $\varphi = 0^\circ$	50	1,23	1,32	1,32	0,09	0,09	7,3	7,3
	70	1,50	1,62	1,62	0,12	0,12	8,0	8,0
	100	1,65	1,75	1,75	0,10	0,10	6,1	6,1
	150	1,72	1,81	1,81	0,09	0,09	5,2	5,2
	500	1,85	1,92	1,92	0,07	0,07	3,8	3,8
	1000	1,90	1,96	1,96	0,06	0,06	3,2	3,2
	2000	1,95	1,98	1,98	0,03	0,03	1,54	1,54

Материал магнито-провода	$H_{\text{внеш.}}$ А/м	$B, Tл$			$\Delta B = B_2 - B_1, Tл$		$\Delta B/B_1, \%$	
		$B_1$ без подмагничив. систем	$B_2$ с подмагн. системой		подмагн. с одн. стороны	подмагн.	С одн. стороны	С 2-х сторон
			С одной стороны	С 2-х сторон				
изотропная сталь $h = 0,5 \text{ мм}$ 1 пласт.	50	0,13	0,37	0,37	0,24	0,24	184,6	184,6
	100	0,51	0,85	0,85	0,34	0,34	66,7	66,7
	150	0,77	1,05	1,05	0,28	0,28	36,4	36,4
	200	0,88	1,17	1,17	0,29	0,29	33,0	33,0
	500	1,20	1,42	1,42	0,22	0,22	15,8	15,8
	1000	1,39	1,53	1,53	0,14	0,14	10,1	10,1
	2000	1,52	1,62	1,62	0,10	0,10	6,6	6,6
ЭС 3406 $\varphi = 90$ 3 пласт.	50	0,05	0,17	0,20	0,12	0,15	240	300
	100	0,18	0,48	0,70	0,30	0,52	166,7	289
	150	0,55	0,85	1,08	0,30	0,53	54,5	96,4
	200	0,97	1,17	1,25	0,20	0,28	20,6	28,9
	500	1,32	1,39	1,40	0,07	0,08	5,3	6,1
	1000	1,39	1,45	1,47	0,06	0,08	4,3	5,8
	2000	1,44	1,51	1,55	0,07	0,11	4,9	7,6

Таблица 2

Увеличение индукции в магнитопроводе, находящемся во внешнем синусоидальном (переменном) поле, при использовании подмагничивающей системы.

Материал магнито-провода	$H_{\text{внеш.}}$ А/м	$B, Tл$			$\Delta B = B_2 - B_1$		$\Delta B/B, \%$	
		$B_1$ без подмагн. систем.	$B_2$ с подмагничивающ. системой		Подмагничивающая система с 1 стороны	Подмагничивающая сист. с 2 ст.	Подмагничивающая система с 1-ой стороны	Подмагничивающая система с 2-х ст.
			С 1-ой стороны	С 2-х сторон				
ЭС 3408 1 пласт.	40	1,13	1,17	1,35	0,04	0,22	3,5	19,5
	50	1,42	1,46	1,60	0,04	0,18	2,8	12,7
	60	1,58	1,64	1,72	0,06	0,14	3,8	8,9
ЭС 3408 3 пласт.	80	1,59	1,63	1,63	0,04	0,04	2,5	2,5
	100	1,68	1,74	1,74	0,06	0,06	3,6	3,6
	120	1,73	1,80	1,80	0,07	0,07	4,1	4,1

Таблица 3

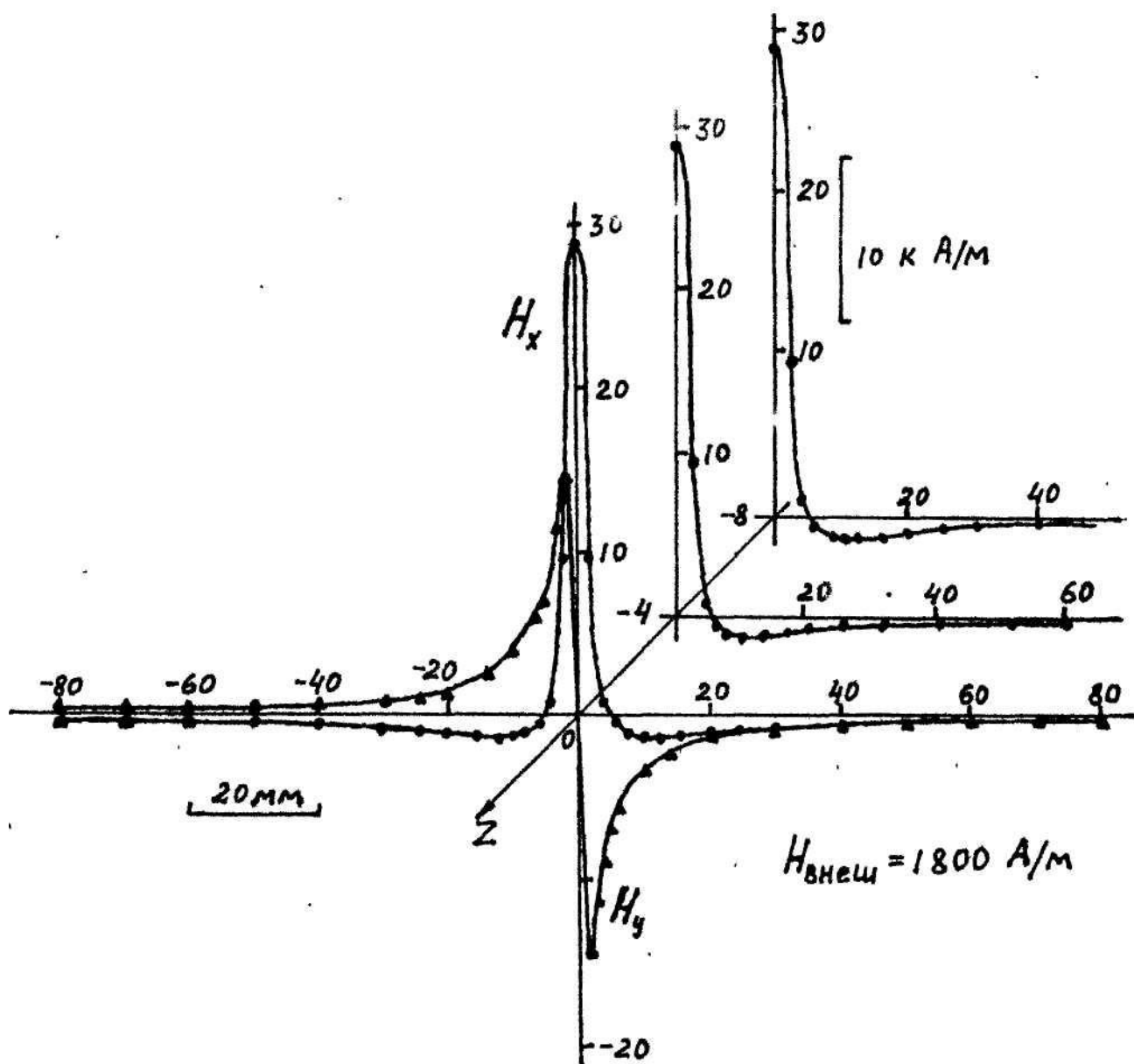
Уменьшение постоянного тока  $I_n$ , необходимого для намагничивания материала до рабочих индукций, в результате применения подмагничивающей системы

Индукция В, Тл	Материал	$I_n, A$			$\Delta I_n = I_2 - I_1$		$\Delta I / I_1, \%$	
		$I_1$ , без подм. системы	$I_2$ с подм. сист.		подмаг. сист. с одной стороны	подмаг. сист. с двух сторон	подмаг. сист. с одной стороны	подмаг. сист. с двух сторон
			с одной стороны	с двух сторон				
1,50	ЭС 3406 $\varphi = 0^\circ$ 1 пласт.	0,028	0,022	0,022	-0,006	-0,006	21,4	21,4
1,60		0,038	0,028	0,028	-0,010	-0,010	26,3	26,3
1,70		0,074	0,041	0,041	-0,033	-0,033	44,6	44,6
1,80		0,351	0,110	0,110	-0,241	-0,241	68,7	68,7
1,90		1,299	0,356	0,356	-0,943	-0,943	72,6	72,6
1,50	ЭС 3408 $\varphi = 0^\circ$	0,024	0,023	0,020	-0,001	-0,004	4,2	16,6
1,60		0,032	0,027	0,022	-0,005	-0,010	15,6	31,3
1,70		0,055	0,036	0,029	-0,019	-0,026	34,5	47,3
1,80		0,164	0,066	0,044	-0,098	-0,120	59,8	73,2
1,90		0,603	0,219	0,153	-0,384	-0,450	63,7	74,6
1,0	Изотропная сталь	0,142	0,074	0,074	-0,068	-0,068	47,9	47,9
1,2		0,274	0,121	0,121	-0,153	-0,153	55,8	55,8
1,4		0,575	0,247	0,247	-0,328	-0,328	57,0	57,0
1,5		0,986	0,411	0,411	-0,575	-0,575	58,3	58,3
1,50	ЭС 3408 3 пласт. $\varphi = 0^\circ$	0,038	0,033	0,031	-0,005	-0,007	13	18,4
1,60		0,047	0,038	0,036	-0,009	-0,011	19	23,4
1,70		0,071	0,047	0,044	-0,023	-0,027	32,4	38
1,80		0,164	0,077	0,068	-0,087	-0,096	53	58,5
1,90		0,547	0,219	0,203	-0,328	-0,344	60	62,9
1,50	ЭС 3406 3 пласт. $\varphi = 0^\circ$	0,028	0,022	0,022	-0,006	-0,006	21,4	21,4
1,60		0,038	0,028	0,028	-0,010	-0,010	26,3	26,3
1,70		0,073	0,040	0,040	-0,033	-0,033	45,2	45,2
1,80		0,350	0,010	0,010	-0,240	-0,240	68,6	68,6
1,90		1,299	0,438	0,438	-0,861	-0,861	66,3	66,3
0,50	ЭС 3406 $\varphi = 90^\circ$	0,080	0,056	0,044	-0,024	-0,036	30	45
0,80		0,096	0,079	0,060	-0,017	-0,036	18	38
1,00		0,112	0,092	0,075	-0,020	-0,037	18	33
1,20		0,151	0,115	0,084	-0,036	-0,067	24	44
1,30		0,247	0,146	0,129	-0,101	-0,118	41	48
1,40		0,699	0,301	0,285	-0,398	-0,414	57	59

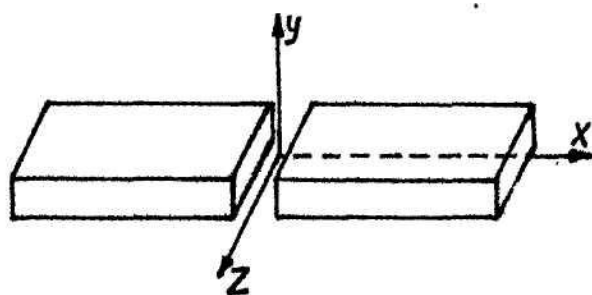
Т а б л и ц а 4

Уменьшение переменного тока  $I_H$ , необходимого для намагничивания материала до рабочих значений индукции, в результате применения подмагничивающей системы

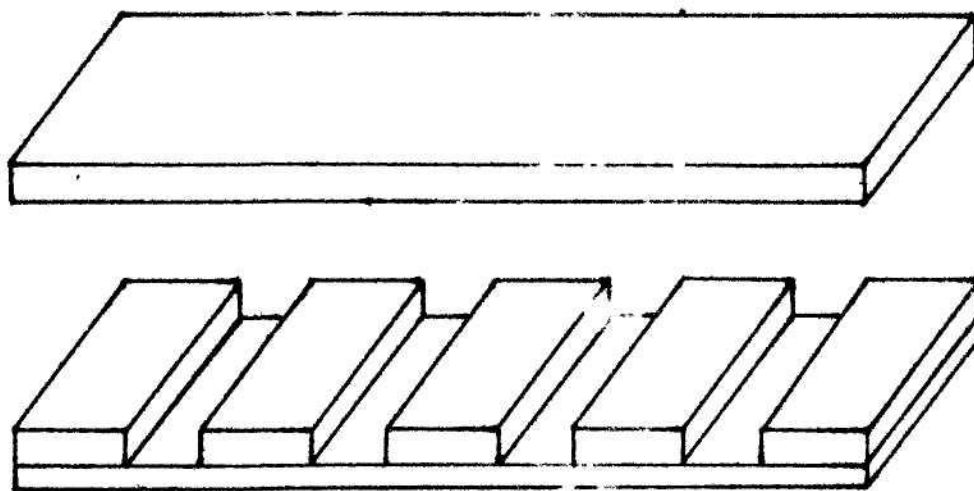
Индукция В, Тл	Материал	$I_H$ , А			$\Delta I_H = I_2 - I_1$		$\Delta I_H / I_1$ , %	
		$I_1$ , без подм. системы	$I_2$ с подм. сист.		Подмагн. система с одной стороны	Подмагн. сист. с 2-х сторон	Подмагн. сист. с одной стороны	Подмагн. сист. с 2-х сторон
			с одной стороны	с двух сторон				
1,50	ЭС 3408	0,025	0,024	0,020	-0,001	-0,005	4	20
1,60	$\varphi = 0^\circ$	0,030	0,026	0,023	-0,004	-0,007	13	23,3
1,70	1 плас.	0,042	0,032	0,027	-0,010	-0,015	23,8	35,7
1,60	ЭС 3408	0,038	0,036	0,036	-0,002	-0,002	5,3	5,3
1,70	$\varphi = 0^\circ$	0,050	0,042	0,042	-0,008	-0,008	16	16
1,80	3 плас.	0,109	0,055	0,055	-0,054	-0,054	49,5	49,5



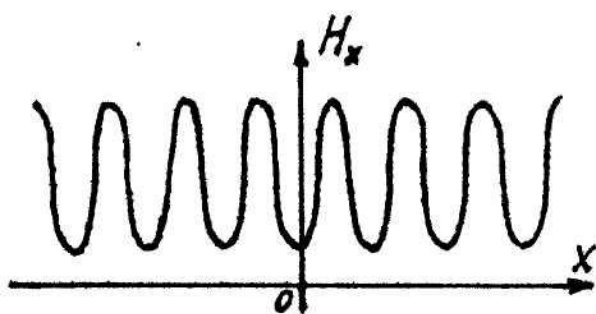
Фиг. 1



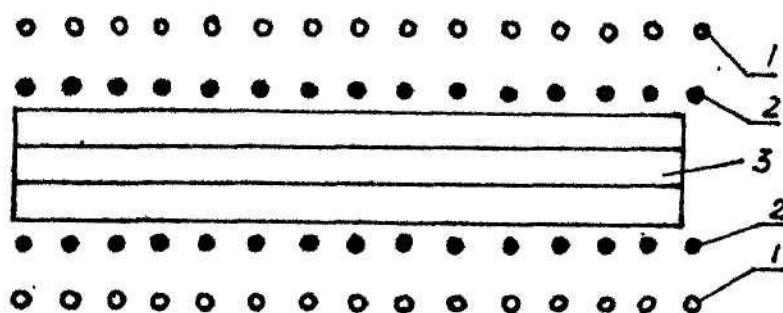
Фиг. 2



Фиг. 3

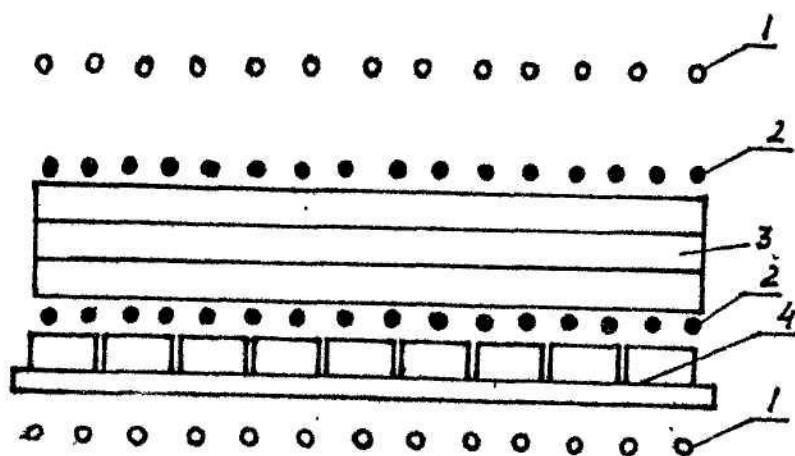


Фиг. 4

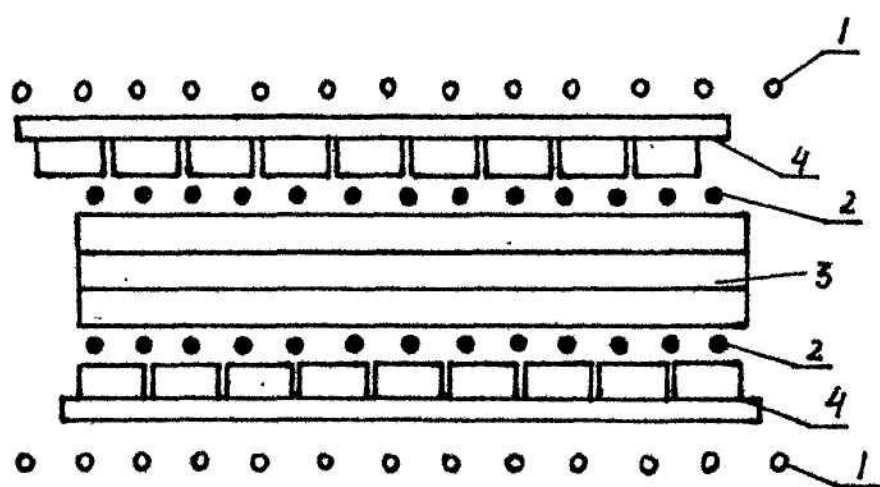


Фиг. 5





Фиг. 6



Фиг. 7