

8.1.1964



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Д.П. Василевская, Л.В. Васильев, Ю.Н. Денисов

P-1475

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

ТДЯЭ, 1965, № 1, с. 174-177.

Дубна 1963

Д.П. Василевская, Л.В. Васильев, Ю.Н. Денисов

P-1475

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

2219/3 48.

Направлено в ПТЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1983

В описываемом ядерном магнитометре используется способ измерения неоднородных магнитных полей, предложенный в работе^{1/1}. Неоднородность измеряемого магнитного поля в сечении ампулы компенсируется дополнительным магнитным полем с противоположным по направлению градиентом, причём напряженность магнитного поля, соответствующего центру ампулы, остается неизменной.

Компенсирующее поле квадрупольного типа создается проводниками с током определенной формы и размеров. На рис.1 и 2 показаны два типа токовых квадрупольей, используемых в датчиках магнитометра. Градиент на оси X при $t \leq \pm 1$ для рассматриваемых токовых квадрупольей выражается следующими формулами (в системе СИ):

а. Квадруполь типа 1 а

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0} = \frac{I}{2\pi a^2} \left[\frac{1}{\gamma^2 + (1-t)^2} + \frac{1}{\gamma^2 + (1+t)^2} \right], \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{l}{a}$, а $t = \frac{x}{a}$.

В центре ампулы, при $t=0$

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0, x=0} = \frac{I}{\pi a^2 (\gamma^2 + 1)}. \quad (2)$$

б. Квадруполь типа 1 б.

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0} = \frac{I}{2\pi \gamma \beta a^2} \left[\operatorname{arctg} \frac{1+\beta-t}{\gamma} + \operatorname{arctg} \frac{1+\beta+t}{\gamma} - \operatorname{arctg} \frac{1+t}{\gamma} - \operatorname{arctg} \frac{1-t}{\gamma} \right], \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{l}{a}$, а $\beta = \frac{\delta}{a}$.

При $t=0$

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0, x=0} = \frac{I}{\pi \gamma \beta a^2} \left[\operatorname{arctg} \frac{1-\beta}{\gamma} - \operatorname{arctg} \frac{1}{\gamma} \right]. \quad (4)$$

в. Квадруполь типа 2 а

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0} = \frac{I}{\pi \alpha_0 t a^2} \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}} - \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)} - \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} + \alpha_0)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} + \alpha_0)} + \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)} \Big] - \frac{I}{2\pi \alpha_0 t^2 a^2} \cdot \\
 & \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0) \right] - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right] + \right. \\
 & + \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \right] - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right) \right] - \\
 & \left. - \frac{\pi}{2} \right\} .
 \end{aligned}$$

При $t=0$

$$\frac{dH_z}{dx} \Big|_{\substack{x=0 \\ z=0}} = \frac{I}{\pi \alpha_0 a^2} \sin 2\alpha_0 . \quad (8)$$

г. Квадруполь типа 2 б.

$$\begin{aligned}
 \frac{dH_z}{dx} \Big|_{z=0} &= - \frac{I \beta^2}{2\pi a^2 \alpha_0 t^2 (\beta^2 - 1)} \left\{ \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{\beta-t}{\beta+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0) \right] - \right. \\
 & - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{\beta-t}{\beta+t} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right] + \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{\beta-t}{\beta+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \right] - \\
 & \left. - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{\beta-t}{\beta+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right) \right] - \frac{\pi}{2} \right\} - \frac{I \beta^3}{\pi a^2 \alpha_0 t (\beta^2 - 1)} \cdot \\
 & \cdot \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)} - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}} + \right. \\
 & + \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)} - \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)} \Big] + \\
 & + \frac{I}{2\pi a^2 \alpha_0 t^2 (\beta^2 - 1)} \left\{ \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0) \right] - \right. \\
 & - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right] + \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \right] - \\
 & \left. - \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left[\frac{1-t}{1+t} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right) \right] - \frac{\pi}{2} \right\} + \frac{I}{\pi a^2 \alpha_0 t (\beta^2 - 1)} \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)} - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}} + \right. \\
& \left. \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)} - \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)} \right] - \\
& - \frac{I \sin 2\alpha_0}{4\pi a^2 \alpha_0 (\beta^2 - 1)} \ln \frac{[(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)]}{[(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)]} \cdot \\
& \cdot \frac{[(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}][(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)]}{[(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}][(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)]} \cdot \\
& \cdot \frac{[(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)]}{[(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right)]} - \frac{I t \sin 2\alpha}{2\pi a^2 \alpha_0 (\beta^2 - 1)} \cdot \\
& \left\{ \frac{\beta [1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)]}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)} - \right. \\
& - \frac{[1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)]}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\pi - \alpha_0)} + \\
& + \frac{\beta [1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}]}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}} - \\
& - \frac{[1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}]}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_0}{2}} + \\
& + \frac{\beta [1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)]}{(\beta+t)^2 + (\beta-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)} - \\
& - \frac{[1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)]}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right)} +
\end{aligned}$$

$$+ \frac{\beta [1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)]}{(\beta + t)^2 + (\beta - t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)} -$$

$$- \frac{[1 - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)] + t [1 + \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)]}{(1+t)^2 + (1-t)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha_0)} \Bigg\} -$$

$$- \frac{I \cos 2\alpha_0}{2\pi a^2 \alpha_0 (\beta^2 - 1)} \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\beta - t \cos \alpha_0}{t \sin \alpha_0} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 - t \cos \alpha_0}{t \sin \alpha_0} -$$

$$- \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\beta + t \cos \alpha_0}{t \sin \alpha_0} + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 + t \cos \alpha_0}{t \sin \alpha_0} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\beta - t \sin \alpha_0}{t \cos \alpha_0} +$$

$$+ \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 - t \sin \alpha_0}{t \cos \alpha_0} + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\beta + t \sin \alpha_0}{t \cos \alpha_0} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 + t \sin \alpha_0}{t \cos \alpha_0} \Bigg] +$$

$$+ \frac{I t \cos 2\alpha_0}{2\pi a^2 \alpha_0 (\beta^2 - 1)} \left[\frac{\beta \sin \alpha_0}{\beta^2 + t^2 - 2\beta t \cos \alpha_0} -$$

$$- \frac{\sin \alpha_0}{1 + t^2 - 2t \cos \alpha_0} - \frac{\beta \cos \alpha_0}{\beta^2 + t^2 - 2\beta t \sin \alpha_0} +$$

$$+ \frac{\cos \alpha_0}{1 + t^2 - 2t \sin \alpha_0} + \frac{\beta \cos \alpha_0}{\beta^2 + t^2 + 2\beta t \sin \alpha_0} -$$

$$- \frac{\cos \alpha_0}{1 + t^2 + 2t \sin \alpha_0} \Bigg| ,$$

где $\beta = 1 + \frac{\delta}{a}$. (7)

При $t = 0$

$$\frac{dH_z}{dx} \Bigg|_{\substack{z=0 \\ x=0}} = \frac{2I \ln \beta}{\pi a^2 \alpha_0 (\beta^2 - 1)} \sin 2\alpha_0 .$$

На рис.1 и 2 приведены графики, показывающие, как изменяется компенсирующий градиент в зависимости от расстояния до центра ампулы для нескольких соотношений размеров проводников. Из этих графиков следует, что для каждого типа токовых квадрупольей существует соотношение размеров, при котором градиент компенсирующего поля почти постоянен до $t \leq 0,7$.

При реальных размерах и допустимой плотности тока через проводники рассматриваемых квадрупольей градиент в центре ампулы составляет $2 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^6$ а/м². Импульсное питание цилиндрического квадруполья, показанного на рис.5, позволило достичь градиента в центре до $32 \cdot 10^6$ а/м² при амплитуде импульсов тока ~ 80 а и скважности 1/6. На рис.3 показаны фотографии резонансных сигналов в магнитном поле напряженностью $8 \cdot 10^5$ а/м с градиентом соответственно $8 \cdot 10^6$ а/м² и $28 \cdot 10^6$ а/м² при оптимальной компенсации. Ширина резонансной линии на рис.3а составляет 160а/м, а на рис.3б 640 а/м, что при таком отношении сигнал/шум позволяет измерить величину напряженности магнитного поля с точностью $\sim 0,01\%$. По току квадруполья при оптимальной компенсации можно по формулам (2), (4), (6), (8) вычислить и величину градиента измеряемого поля.

Ампула и квадруполь, показанные на рис.5, используются при измерении магнитных полей с напряженностью более $3 \cdot 10^5$ а/м. Для измерения меньших полей объем ампулы, а, следовательно, и размеры токового квадруполья необходимо несколько увеличить.

Следует особо отметить довольно высокие требования к точности изготовления

токовых квадрупольей и к концентричности размещения ампулы внутри квадруполя. Однако опыт изготовления и исследования нескольких комплектов таких датчиков показал, что необходимая точность изготовления и сборки реально достижима.

Принципиальная схема магнитометра показана на рис.4. Как и в магнитометре, описанном в работе ^{/2/}, выносной датчик располагается непосредственно в зазоре магнита, поле которого измеряется.

Управление частотой и уровнем генерации автодинного детектора ядерного магнитного резонанса осуществляется дистанционно. Органы управления располагаются в основном блоке прибора. Грубая установка частоты автодина производится специальным малогабаритным переменным конденсатором с приводом от электромотора постоянного тока, причём в качестве статорного поля мотора используется измеряемое магнитное поле. Для точной подстройки служит варикап.

Конструкция датчика показана на рис.5.

Частота автодинного детектора измеряется автоматическим электронно-счётным частотомером.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.Н. Денисов. ПТЭ №1, 82 (1960).
2. Ю.Н. Денисов. ПТЭ №5, 67 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел
26 ноября 1963 г.

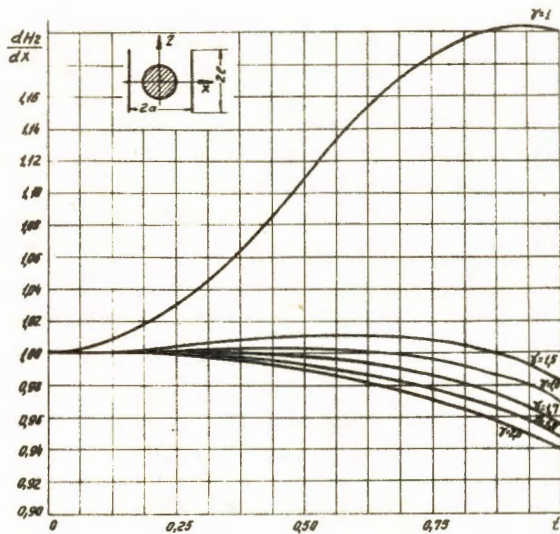


Fig. 1a

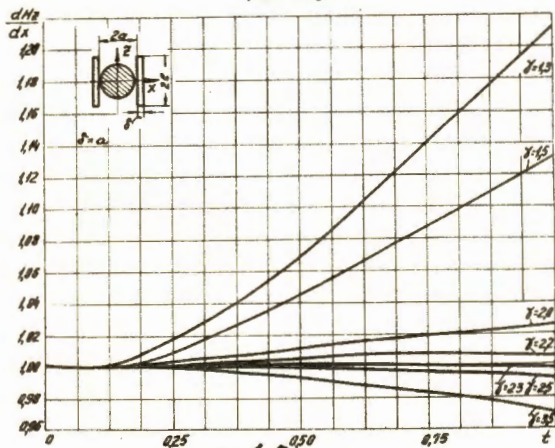


Fig. 1b

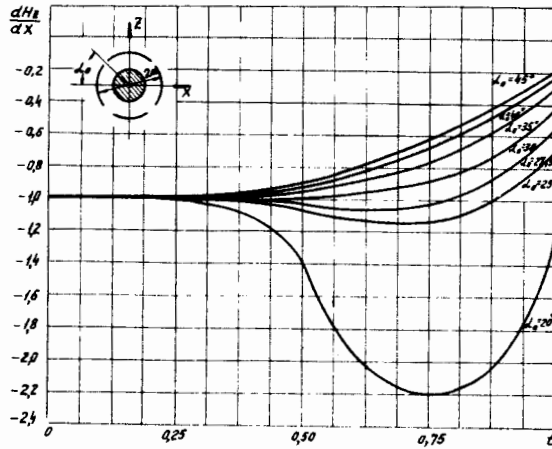


Рис. 2а

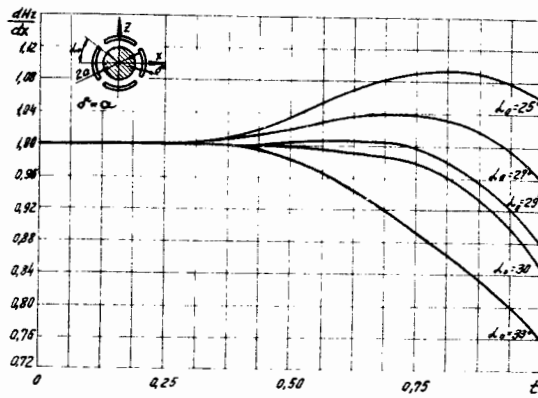
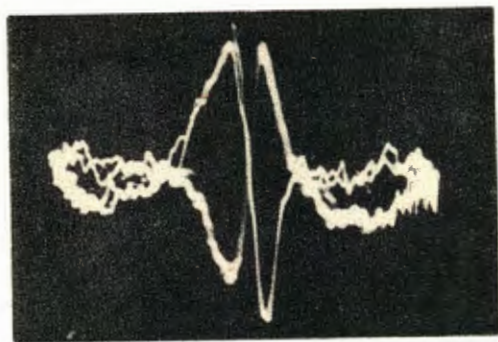
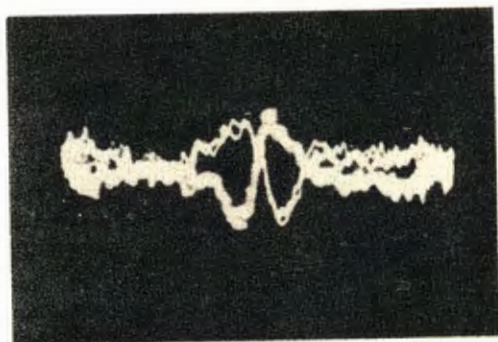


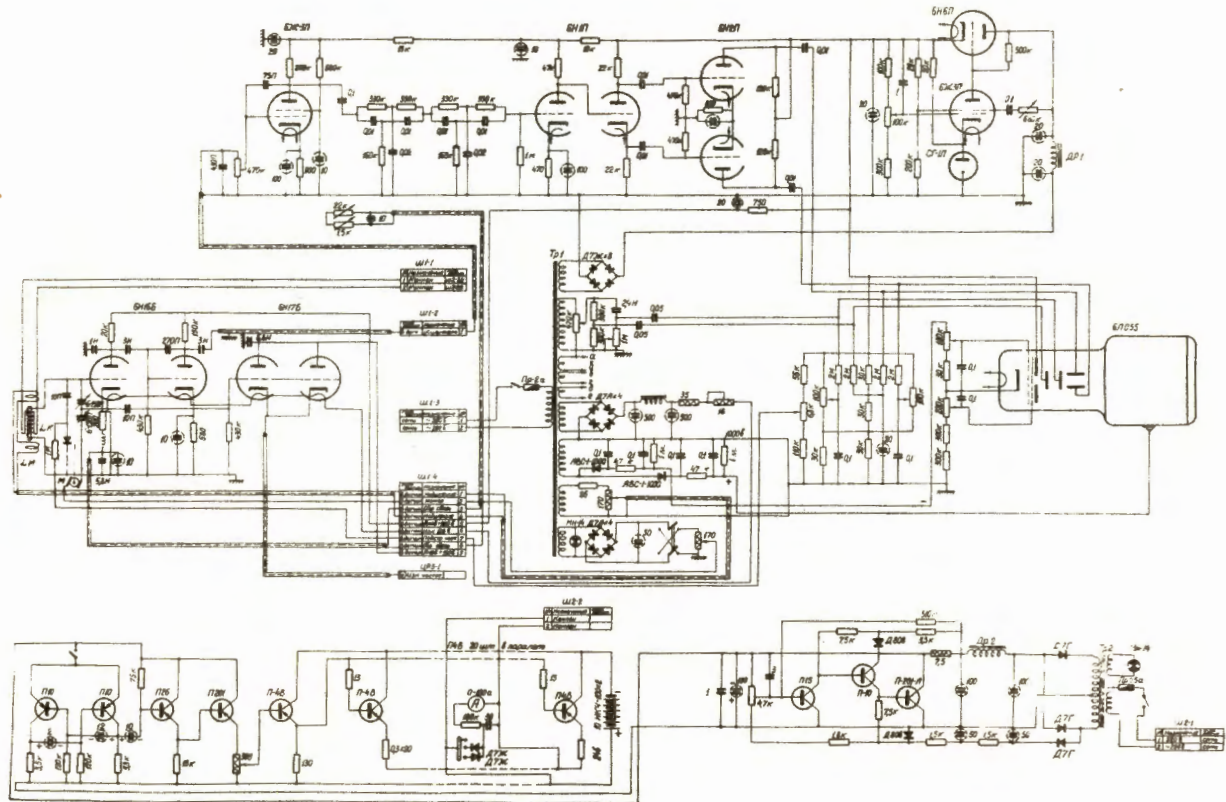
Рис. 2б



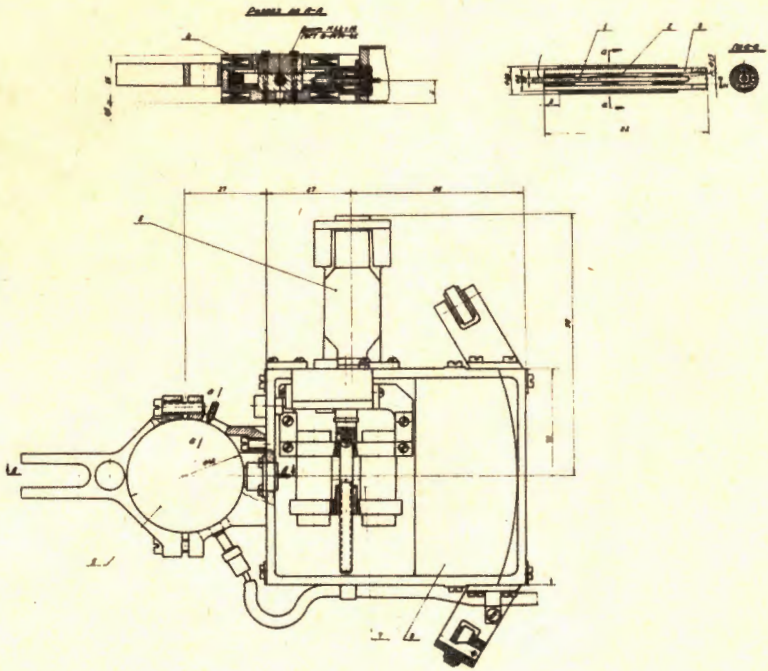
Puc. 3a.



Puc. 3b.



Puc. 4



Puc. 5