

СЗ45е4  
А-695

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10 - 4930



В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, П.Т. Шишлянников

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

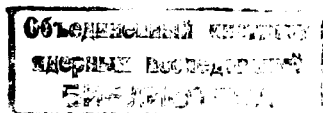
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1970

В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, П.Т. Шишляников

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

82841, цр



При формировании магнитного поля изохронных циклотронов и синхроциклотронов с пространственной вариацией поля необходимо выполнить большой объем магнитных измерений. Результаты измерений обрабатываются на специализированных <sup>1/</sup> либо универсальных вычислительных машинах. Обычно анализируются следующие характеристики формируемого магнитного поля:

а) зависимость средней величины поля  $B_{z\text{ ср}}$  от радиуса;

б) амплитуды и начальные фазы ряда гармоник функции распределения магнитного поля по азимуту для заданных радиусов -  $B_z(\phi, r)|_{r=r_i}$ .

При измерении магнитных полей циклических ускорителей в Лаборатории ядерных проблем принята полярная система перемещения датчиков магнитометров. Датчики перемещаются по окружности с фиксированным радиусом  $r_i$  относительно центра магнитной системы ускорителя в пределах от  $\phi_0 = 0$  до  $\phi_k = 360^\circ$ .

Магнитное поле в процессе азимутального перемещения датчика измеряется или непрерывно, или в отдельных точках, равномерно распределенных по окружности. Таким образом, в результате полного цикла магнитных измерений топография магнитного поля ускорителя представляется некоторым количеством функций  $B_z(\phi)|_{r=r_i}$ , полученных для ряда значений радиуса  $r_i$ .

Необходимая точность измерения распределения магнитного поля по азимуту и допустимый радиальный шаг  $\Delta r = r_{i+1} - r_i$  определяются требованиями к точности формирования магнитного поля ускорителя. Для

изохронных циклотронов и фазотронов с вариацией поля точность определения основных характеристик магнитного поля  $V_{z\text{ ср}}(r)$  и амплитуд гармоник  $V_{mk}(r)$  должна составлять соответственно  $(0,01 \pm 0,05)\%$  и  $10^{-4} V_{z\text{ ср}}$ . Если функции распределения магнитного поля по азимуту получаются путем измерения значений поля в некотором числе равномерно распределенных по окружности точек, то общее число замеров поля только в одном цикле измерения топографии с приведенной точностью должно быть не менее  $5000 \pm 10000$ . Поскольку обычно формирование магнитного поля ускорителя ведется методом последовательных приближений и число циклов "измерение-обработка-коррекция" составляет несколько десятков, выполнение этой работы без широкого применения средств автоматизации практически невозможно.

В настоящей работе описывается устройство, позволяющее автоматизировать все основные операции процесса магнитных измерений: перемещение датчика холловского магнитометра по азимуту; измерение величины поля в 144 равномерно распределенных по окружности точках; регистрацию результатов измерений цифрорпечатающей машинкой и перфоратором. Кроме того, устройство позволяет пробивать на перфоленте дополнительную "служебную" информацию, необходимую для последующей обработки результатов измерений на ЭВМ.

Блок-схема разработанной системы автоматического измерения магнитного поля циклических ускорителей приведена на рис. 1.

Основной особенностью автоматизированного измерительного стенда является непрерывное, относительно равномерное азимутальное перемещение датчика холловского магнитометра при измерении распределения магнитного поля по окружности  $V_z(\phi)|_{r=r_1}$ . Магнитное поле измеряется через равные угловые интервалы  $2,5^\circ$ , т.е. в 144 точках. Измерение поля в каждой точке производится следующим образом (см. рис. 2а). При замкнутых контактах реле к измерительным электродам холловского датчика подключены емкость  $C_{вх}$  и вход цифрового вольтметра. Если датчик находится в стационарном магнитном поле, то напряжение, регистрируемое цифровым вольтметром, практически равно ЭДС Холла, поскольку входное сопротивление измерителя  $R_{вх}$  составляет  $25 \times 10^3$  Ом, а выходное

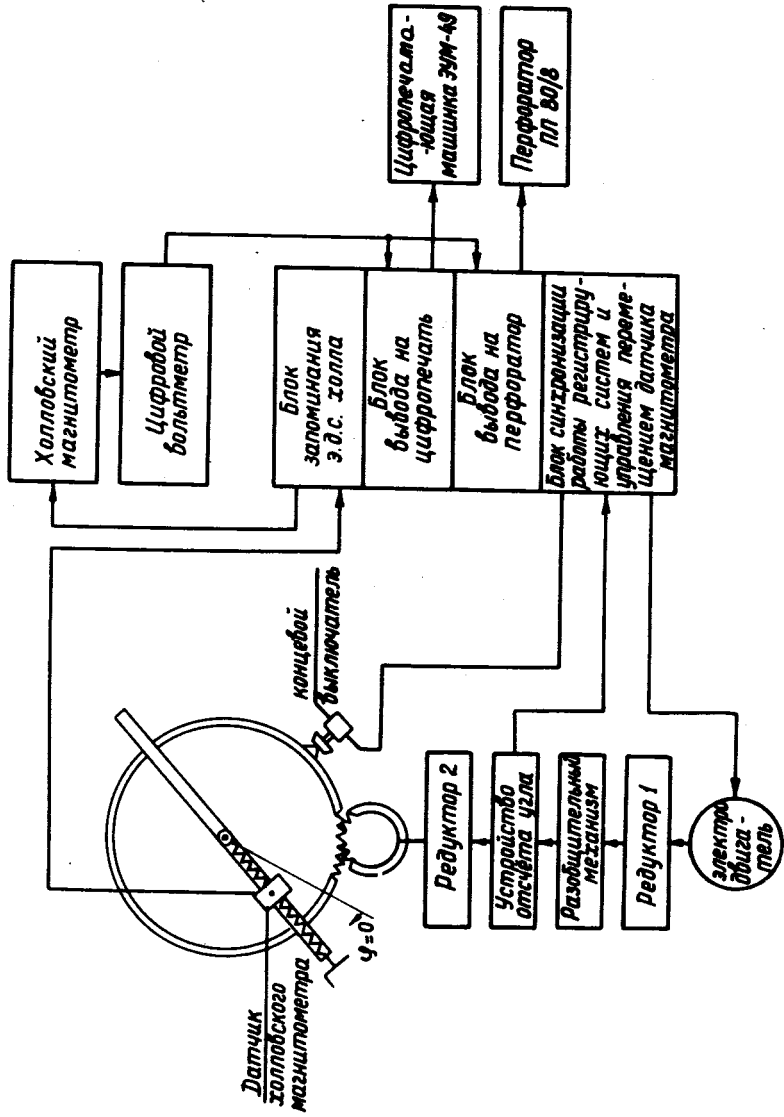


Рис.1. Блок-схема автоматизированного измерительного стенда.

сопротивление датчика  $\sim 200$  ом. Входная емкость  $C_{вх}$  заряжается до  $U_{вх}$  и не оказывает влияния на результаты измерений. При непрерывном движении датчика в неоднородном магнитном поле  $U_x$  меняется, и измерение поля в заданных точках становится невозможным, поскольку процесс измерения входного напряжения прецизионным цифровым вольтметром длится сотни миллисекунд (для используемого в приборе вольтметра ДМ 2010  $t_{изм.} \approx 0,5$  сек), а ЭДС Холла за это время может измениться на величину, существенно превышающую допустимые ошибки измерений.

Точность измерения неоднородного магнитного поля может быть повышена введением в схему измерений элемента, запоминающего ЭДС Холла в заданный момент времени. Простейшим устройством, выполняющим эту функцию, является конденсатор, подключенный параллельно входным зажимам цифрового вольтметра. В момент прохождения датчика через заданную точку зазора магнита реле отключает конденсатор от холловских электродов, и на нем "запоминается" напряжение  $U_x$ , соответствующее магнитному полю в этой точке. Благодаря очень большой величине входного сопротивления цифрового вольтметра разряд емкости происходит медленно. При соответствующем подборе величины  $C_{вх}$  снижение напряжения на нем за время измерения  $t_{изм.}$  может быть сделано меньшим допустимой величины ошибки измерения.

Рассмотрим условия, диктующие выбор емкости конденсатора  $C_{вх}$ . Этих условий два.

Во-первых, скорость разряда конденсатора  $C_{вх}$  должна быть такой, чтобы относительное снижение напряжения на нем  $\Delta U / U_x$  за время измерения вольтметра  $t_{изм.}$  было меньше допустимой ошибки  $\delta_p$ . Таким образом, минимальная величина запоминающей емкости  $C_{вх. min}$  находится из выражения

$$C_{вх min} \geq - \frac{t_{изм.}}{R_{вх} \ln(1 - \delta_{p max})} \approx \frac{t_{изм.}}{R_{вх} \delta_{p max}}, \quad (1)$$

где  $R_{вх}$  - эквивалентное сопротивление разряда  $C_{вх}$ , состоящее из входного сопротивления цифрового вольтметра, сопротивления утечки конденсатора и сопротивления утечки между контактами размыкающего реле.



Для рассматриваемого прибора эти величины соответственно равны:  
 $R_{\text{вх.п.в.}} \approx 25 \times 10^9 \text{ ом}$ ,  $R_{\text{у.конд.}} \approx 10^{10} \text{ ом}$ ,  $R_{\text{у.реле}} \approx 10^9 \text{ ом}$ .

Второе условие, ограничивающее максимальную величину конденсатора  $C_{\text{вх.}}$ , определяется интегрирующим характером зарядной цепи, состоящей из внутреннего сопротивления датчика Холла  $R_{\text{вн}}$  и емкости  $C_{\text{вх.}}$ . Для случая измерения магнитных характеристик изохронных циклотронов и фазотронов с пространственной вариацией магнитного поля зависимость измеряемого поля от азимута в первом приближении может быть записана в виде

$$B_z(\phi) = B_{z \text{ ср}}(r) [1 + m_k \sin k \phi] , \quad (2)$$

где  $B_{z \text{ ср}}(r)$  - величина среднего поля на радиусе  $r$ ,  $k$  - номер основной гармоники,  $m_k = \frac{B_{mk}}{B_{z \text{ ср}}(r)}$  - глубина модуляции магнитного поля на основной гармонике. ЭДС на измерительных электродах холловского датчика пропорциональна полю

$$U_x = A B_{z \text{ ср}}(r) [1 + m_k \sin k \phi] , \quad (3)$$

где  $A$  - чувствительность датчика. Зависимость напряжения на конденсаторе  $C_{\text{вх}}$  от азимутальной координаты датчика  $\phi$  при некоторой постоянной скорости движения датчика  $\dot{\phi} = \frac{2\pi k}{T}$  имеет несколько иной характер

$$U_c = A B_{z \text{ ср}}(r) [1 + m_k \sin(k\phi + \psi)] , \quad (4)$$

где  $\psi = -\arctg(R_{\text{вн}} C_{\text{вх}} \dot{\phi})$  - дополнительный сдвиг фазы синусоидальной компоненты сигнала из-за временной задержки на цепочке  $R_{\text{вн}} \cdot C_{\text{вх}}$ . Погрешность измерения магнитного поля в рассматриваемой схеме максимальна в моменты перехода гармонической компоненты  $U_x$  через нулевые значения, когда

$$\frac{U_c}{U_x} = 1 + \sin \psi . \quad (5)$$



При соответствующем выборе скорости перемещения датчика по азимуту (в рассматриваемом приборе угол  $2\pi$  проходит за  $T = 5$  мин) и реальных величинах других параметров схемы ( $R_{ВН}$ ,  $C_{ВХ}$ ) угол  $\psi$  весьма мал, и ошибка в измерении поля может быть записана в виде

$$\delta_3 \approx m_k R_{ВН} C_{ВХ} \dot{\phi} \quad (6)$$

Следовательно, при заданной максимальной ошибке  $\delta_{3, \max}$  максимальная величина конденсатора  $C_{ВХ}$  определяется из выражения

$$C_{ВХ, \max} \leq \frac{\delta_{3, \max}}{m_k R_{ВН} \dot{\phi}} \quad (7)$$

Таким образом величина запоминающего конденсатора при заданных допустимых ошибках  $\delta_{p, \max}$  и  $\delta_{3, \max}$  выбирается из условия

$$C_{ВХ, \min} \leq C_{ВХ} \leq C_{ВХ, \max} \quad (8)$$

При измерении описываемым прибором топографии магнитного поля модели магнитной системы фазотрона с вариацией поля, для которой  $m_4 = 0,2$ , емкость конденсатора  $C_{ВХ}$  была выбрана равной 10 мкф. В этом случае для приведенных ранее параметров схемы  $\delta_p = 2,5 \times 10^{-5}$  и  $\delta_3 = 1,6 \times 10^{-5}$ , что вполне допустимо при требовании общей точности измерений  $(3+5) \cdot 10^{-2}\%$ .

Перемещение датчика Холла в зазоре магнита по радиусу и азимуту производится при помощи приспособления, кинематическая схема которого показана на рис. 1. Приспособление состоит из приводного двигателя типа ДВА-УЗ, имеющего скорость вращения  $\approx 1500$  об/мин; редуктора Р1 с передаточным отношением 1/52; разобщительного механизма, позволяющего переходить на ручной привод; точного отсчетного устройства для  $\phi$ ; редуктора Р2 с передаточным отношением 1/144; опорного кольца с зубчатым венцом; балки с закрепленным в середине штырем (осью вращения всего приспособления) и направляющими, по которым при помощи ходового винта перемещается в радиальном направлении каретка с датчиком Холла.

В качестве отсчетного устройства для  $\phi$  выбрана оптико-механическая система (см. рис. 3), состоящая из диска с узкой регулируемой по ширине щелью; источника света с коллиматорами; фотодиода. Диск со щелью насажен на ведомый валик редуктора P1. Он делает один оборот за время азимутального перемещения датчика на  $2,5^\circ$ , т.е. на угловой интервал между двумя точками измерения магнитного поля. В моменты совпадения щели диска со щелью источника света, на фотодиод приходит световой импульс, длительность которого равна

$$\tau_{\text{и.св.}} \approx \frac{d_{\text{щ}}}{\pi D_{\text{д}} n_{\text{д}}}, \quad (9)$$

где  $d_{\text{щ}}$  - ширина щелей в диске и источнике света,  $D_{\text{д}}$  - диаметр диска (по щели),  $n_{\text{д}}$  - скорость вращения диска. Схема регистрации электрического импульса, возникающего на фотодиоде, показана на рис. 4. Амплитуда импульса, поступающего с фотодиода на вход эмиттерного повторителя, составляет  $\approx 8$  в, а длительность его переднего фронта  $\tau_{\text{ф+}}$  равна 1 мсек. Нестабильность порога дискриминации и амплитуды этого импульса приводит к некоторой ошибке в результатах измерений поля (быстрые флуктуации), либо фазы гармонической компоненты функции распределения магнитного поля по азимуту (в случае медленных, температурных изменений). Если принять максимально возможную временную нестабильность отсчетного устройства  $\Delta t$  равной длительности переднего фронта импульса  $\tau_{\text{ф+}}$ , то максимальная ошибка измерения поля составит  $\delta_t \leq \Delta t_x \times \frac{dB}{d\phi} \dot{\phi}$ , а для фазы  $\Delta\phi < \Delta t \dot{\phi}$ . Для приведенных выше характеристик прибора  $\delta_t \leq 2 \times 10^{-3}\%$  и  $\Delta\phi \leq 3''$ , что вполне допустимо.

Ошибки, которые могли быть вызваны люфтами в редукторе P2, исключаются благодаря тому, что измерения производятся только при одном направлении движения опорного кольца и практически постоянной скорости азимутального перемещения.

Еще один источник нестабильности момента измерения магнитного поля обусловлен задержкой срабатывания реле, отключающего запоминающий конденсатор от датчика Холла. В приборе для этой цели используется вакуумное реле с задержкой отключения на 5 мсек. Если скорость

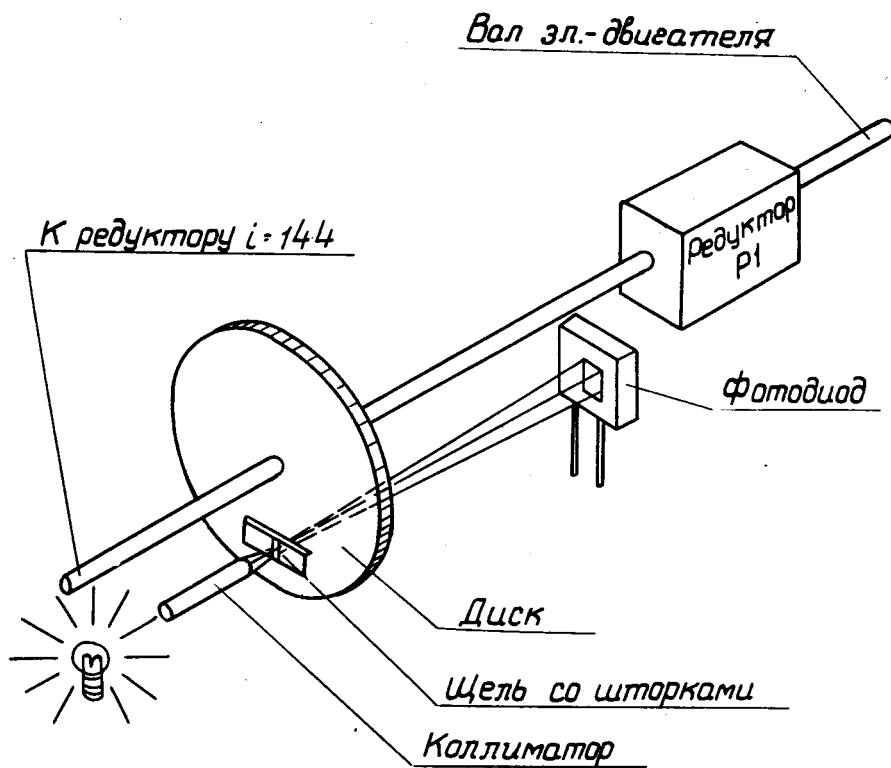


Рис.3. Оптико-механическая система отсчета угла поворота измерительного устройства (схема).

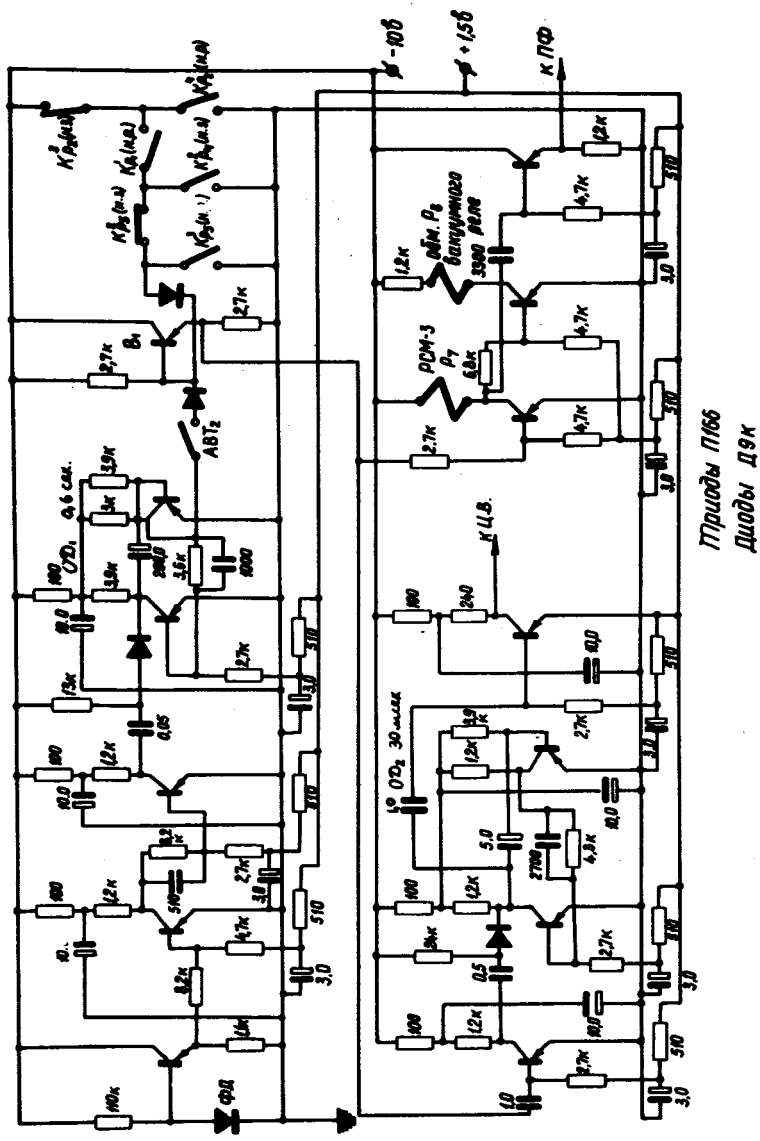


Рис.4. Принципиальная схема запуска измерительных и регистрирующих устройств.

азимутального движения датчика будет меняться в процессе измерений на  $\pm 10\%$ , то момент срабатывания реле будет изменяться на  $\pm 0,5$  мсек. Однако оценки, приведенные в предыдущем абзаце, показывают, что вносимые этим эффектом ошибки для реально требуемых точностей измерений не имеют существенного значения ( $\delta_{\text{реле}} \leq 10^{-3}\%$ ).

Рассмотрим работу автоматической системы управления всем измерительным комплексом в целом.

Измерительный комплекс включает следующие приборы и устройства: прецизионный холловский магнитометр /2/ с цифровым вольтметром типа ДМ 2010 в качестве измерителя; блок вывода данных с цифрового вольтметра на цифроречатающую машинку ЭУМ-46 /3/; блок вывода данных с цифрового вольтметра на перфоратор типа ПЛ 80/8 с системой записи служебной информации /4/, электромеханическое устройство перемещения датчика в зазоре магнита. Управляется этот комплекс блоком синхронизации работы всех регистрирующих и приводных систем. Принципиальные схемы отдельных узлов этого блока показаны на рис. 2 и 4.

Электромеханическое устройство для перемещения датчика в зазоре магнита имеет два режима работы: с ручным управлением и автоматическим. Ручное управление используется только для начальной установки датчика на азимут  $\phi_0 = 0$ . Измерения идут в автоматическом режиме. Выбор рода работы производится переключением тумблера "ручное-автоматическое" в соответствующее положение.

При ручном управлении включение и реверсирование приводного двигателя осуществляется кнопками "прямо" и "реверс". Если нажата кнопка "прямо", через ее нормально разомкнутые контакты возбуждается реле  $P_1$ , которое, замкнув свои контакты  $KP_1^1$  (н.р.),  $KP_1^2$  (н.р.) и  $KP_1^3$  (н.р.), включит двигатель. Опорное кольцо в этом случае вращается вокруг центра магнита по часовой стрелке. Одновременно размыкается контакт  $KP_1^5$  (н.з.), блокирующий возможность включения реле  $P_2$  кнопкой "реверс" во время прямого движения. Обратное направление движения кольца может быть включено только после остановки (выключения) реле  $P_1$ . Следует отметить, что кольцо в этом режиме движется только при нажатых кнопках "прямо" либо "реверс", т.к. цепи блокирующих

контактов  $KP_1^4$  (н.р.) и  $KP_2^4$  (н.р.) разорваны тумблером выбора режима работы.

Для перевода устройства перемещения датчика в автоматический режим работы тумблер выбора рода работы устанавливается в положение "автоматическое", и нормально замкнутой кнопкой "сброс" реле  $P_4$  и  $P_5$

переводятся в исходное, невключенное состояние. Система готова к автоматической работе. В этот момент датчик должен располагаться за  $1+2^\circ$  до азимута  $\phi_0 = 0$ . Этот угловой заход необходим для того, чтобы после трогания с места двигатель до входа в рабочую зону (зону измерения магнитного поля) успел набрать номинальные обороты, а в редукторах были выбраны люфты. Включение двигателя в рабочем, "прямом" направлении осуществляется, как и при ручном управлении, кнопкой "прямо". Система измерения магнитного поля включается не сразу после начала движения, а только после того, как опорное кольцо пройдет азимутальное положение, принятое за нулевое. Для фиксации этого азимута в зазоре магнита устанавливается концевой выключатель, который нажимается штоком, укрепленным на опорном кольце за  $0,5+1^\circ$  до  $\phi_0 = 0$ . При замыкании концевого выключателя подается питание на реле  $P_6$ , которое, в свою очередь, замыкает контакты  $KP_6^1$  (н.р.) и  $KP_6^2$  (н.р.), запитывающие реле  $P_4$  и  $P_5$ . Оба эти реле оказываются под напряжением одновременно, но срабатывает и встает на самоблокировку только реле  $P_4$ . Обмотка  $P_5$  закорачивается тиристором Д 235Г, открываемым импульсом с обмотки реле  $P_4$ . В этом состоянии все реле схемы управления останутся в течение всего рабочего хода (всего цикла измерений).

После срабатывания реле  $P_4$  через его контакты  $KP_4^1$  (н.р.) и  $KP_4^2$  (н.з.), а также через контакт  $KP_2^6$  (н.з.) на вентиль  $V_1$  подается разрешающий потенциал - 10 в. Через этот вентиль импульсы с фотодиода, расширенные одновибратором  $ОД_1$  до  $\approx 0,6$  сек, поступают в исполнительные цепи, где они выполняют следующие функции: включают реле  $P_7$  и выключают вакуумное реле  $P_8$ , разрывающее цепь заряда запоминающей емкости  $C_{вх}$ . С задержкой  $\approx 30$  мсек (формируется одновибратором  $ОД_2$ ), необходимой для гарантированного срабатывания реле

$P_8$ , передним фронтом этого импульса запускается цифровой вольтметр. По истечении времени измерения (через 440 мсек) на выходе дешифраторов цифрового табло вольтметра появляется код результата. Импульсом, формируемым задним фронтом сигнала с одновибратора ОД<sub>1</sub>, т.е. через 70,16 сек после конца процесса измерения  $U_c$  цифровым вольтметром, запускается блок вывода информации с вольтметра на перфоратор. Одновременно этот же результат может быть зарегистрирован цифрорпечатающей машинкой.

Этот процесс повторяется во время рабочего хода датчика 144 раза.

После того как датчик пройдет  $360^\circ$ , шток, укрепленный на опорном кольце, вторично замыкает концевой выключатель, что приводит к срабатыванию реле  $P_6$  и замыканию контактов  $KP_6^1$  (н.р.) и  $KP_6^2$  (н.р.). Теперь реле  $P_5$  включится, поскольку импульса, открывающего тиристор, не будет (реле  $P_4$  все время рабочего цикла было включено за счет блокирующего контакта  $KP_4^3$  (н.р.)). Включение  $P_5$  приведет к отключению разрешающего потенциала вентиля  $V_1$  (контакты  $KP_5^2$  (н.з.),  $KP_5^3$  (н.р.)) и размыканию цепи питания реле  $P_1$  и  $P_2$  ( $KP_5^1$  (н.з.)). Командные импульсы перестанут проходить к исполнительным схемам. Приводной электродвигатель после некоторого "выбега" остановится.

После остановки двигателя, перед тем как включить реверсное движение, необходимо нажатием кнопки "сброс" привести схему релейной автоматики в исходное состояние. Затем кнопкой "реверс" (в режиме автоматической работы) двигатель включается и вращает опорное кольцо против часовой стрелки. Порядок срабатывания реле  $P_6$ ,  $P_4$  и  $P_5$  такой же, как и при рабочем ходе, но поскольку контакты реле  $P_2$ ,  $KP_2^6$  (н.з.) и  $KP_2^7$  (н.р.) отключили разрешающий потенциал вентиля  $V_1$ , магнитное поле в процессе возврата датчика в исходное положение  $\phi_0 = 0$  изменяться и регистрироваться не будет.

После того как датчик придет в исходное положение, второй раз сработает концевой выключатель, двигатель отключится, и опорное кольцо остановится. Нажатием кнопки "сброс" схема релейной автоматики опять приводится в исходное состояние. Устройство готово к выполнению следующего цикла измерения азимутального распределения магнитного поля на другом радиусе.

На основе проводившихся выше оценок погрешностей, вносимых в результаты измерений магнитного поля отдельными элементами и узлами автоматической системы, можно определить вероятную суммарную дополнительную ошибку

$$\delta_{\text{авт.}} = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_p^2 + \delta_t^2 + \delta_{\text{реле}}^2} \quad (10)$$

Для автоматической системы, используемой в измерительном стенде модели магнитной системы установки "Ф",  $\delta_{\text{авт.}} \approx 4 \times 10^{-3}\%$ . Для требуемой точности измерений  $0,02 + 0,05\%$  такая величина добавочной погрешности вполне допустима.

Для экспериментальной проверки стабильности работы узлов автоматической системы было проведено семикратное измерение азимутального распределения магнитного поля модели на одном и том же радиусе  $r_1$ . Полученные результаты показали, что разброс измеренных величин среднего магнитного поля составляет  $\pm 1,5 \times 10^{-2}\%$ , а амплитуд гармоник  $- 5 \times 10^{-2}\% B_{z \text{ ср}}$ .

В заключение считаем своим приятным долгом выразить благодарность В.И. Сидоровой, разработавшей конструкцию приводного механизма.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов и др. ПТЭ, №3, 224, 1968.
2. Д.П. Василевская, Ю.Н. Денисов, Н.И. Дьяков. Препринт ОИЯИ, 2405, 1965.
3. В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, П.Т. Шишлянников. Препринт ОИЯИ, 10-3658-1, 1968.
4. В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, Н.И. Дьяков. Препринт ОИЯИ, 10-4288, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

16 февраля 1970 года.