

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том III

Выпуск 1

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА 1965

УДК 551.508.94:629.192.2:550.3

Г. Л. Гдалевич, И. М. Имянитов, Я. М. Шварц

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ФЛЮКСМЕТР, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В ВЫСОКИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ**

Описывается помехоустойчивый прибор для измерения напряженности электростатического поля, предназначенный для измерения в высоких слоях атмосферы. Приводятся блок-схема и принципиальная электрическая схема прибора. Описывается конструкция датчика. Диапазон измерений прибора составляет $\pm 2 \div 3$ в·см⁻¹, ошибка измерений $\pm 0,25$ в·см⁻¹ $\pm 0,25 E_{\text{изм}}$.

Зондирующие объекты, предназначенные для высотных геофизических измерений, попадая в верхние слои атмосферы и уходя за ее пределы, заряжаются благодаря неравенству тепловых скоростей ионов и электронов, фотоэмиссии и по некоторым другим причинам [1]. При этом они приобретают электрический потенциал относительно плазмы. У поверхности зондирующего объекта появляются квазиэлектростатическое поле и слой объемного заряда, экранирующий ионосферную плазму от поля объекта. Величина напряженности поля в определенной точке поверхности объекта определяется как потенциалом объекта относительно плазмы, так и толщиной и структурой слоя объемного заряда вблизи этой точки. Толщина слоя косвенным образом зависит от величины внешнего электростатического поля в той области высоких слоев атмосферы, через которую проходит зондирующий объект [2].

Измерение напряженности электростатического поля у поверхности зондирующих объектов, находящихся в высоких слоях атмосферы, полезно, так как, во-первых, при помощи таких измерений получают данные о зарядении зондирующих объектов в высоких слоях, во-вторых, эти данные используются для оценки внешнего электростатического поля, существующего в той области высоких слоев, где производятся измерения. Измерение зарядения тел представляет интерес для изучения условий их торможения [3], для измерений, результаты которых зависят от потенциала тела [4], и, наконец, само зарядение тел является индикатором, позволяющим изучать некоторые свойства атмосферы [5].

Для измерения напряженности электростатического поля у поверхности объекта нами используется электростатический флюксметр ротационного типа, модернизированный с учетом специфики измерений в ионосферной плазме [2]. При разработке приборов для таких измерений приходится сталкиваться с двумя основными трудностями. Во-первых, измерение ведется на фоне тока помехи, создаваемого несвязанными с измеряемым полем потоком заряженных частиц на измерительную пластину датчика и фототоком с нее. Этот ток создает на входном сопротивлении прибора напряжение помехи, которое иногда в десятки и сотни раз может превышать напряжение сигнала и имеет ту же частоту, что и напряжение сигнала. Во-вторых, измерения могут вестись в тонком, порядка 1 см, слое объемного заряда, что предъявляет жесткие требования к конструк-

ции воспринимающей части датчика. Для подавления токов помехи в описываемом приборе используются сеточные электроды и синхронный детектор [2].

Переходим к описанию аппаратуры.

Блок-схема измерительной аппаратуры представлена на рис. 1, где *Д1* и *Д2* — датчики, основное назначение которых состоит в преобразовании измеряемой напряженности электростатического поля *E* в переменное напряжение *V*, величина которого пропорциональна измеряемой напряженности электростатического поля, а фаза определяется направлением поля. Эту работу выполняет электростатический генератор *Э*. Син-

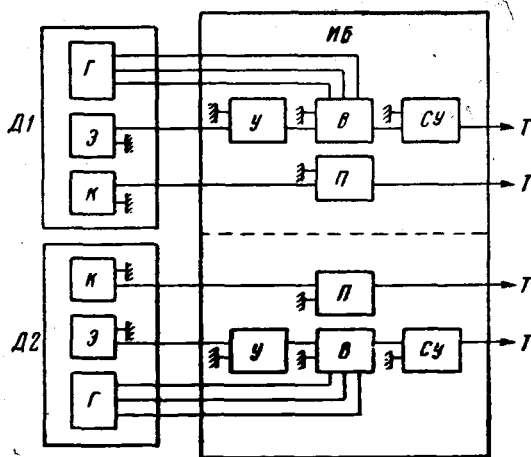


Рис. 1. Блок-схема прибора

хронный электромагнитный генератор датчика *Г* вырабатывает опорное напряжение для питания синхронного детектора. В датчике монтируется специальный электрод — коллектор *К* для измерения электрического тока, создаваемого потоком заряженных частиц, проникающим через сетчатые пластины датчика. Измерительный блок *ИБ* состоит из двухканального усилителя *У*, служащего для усиления напряжения *V*, согласующего устройства *СУ* для соединения с телеметрией, двух катодных повторителей *П* для измерения напряжения, создаваемого электрическим током, текущим на коллекторы датчиков и двух синхронных детекторов *В*, предназначенных для выпрямления напряжения после усиления и определения знака поля.

Датчики прибора размещались на поверхности приборного отсека геофизической ракеты и на поверхности контейнера высотной герметизированной автоматической станции в симметричных точках.

Общий вид конструкции датчика прибора представлен на рис. 2.

Датчик состоит из следующих узлов: 1 — двигатель со щетками; 2 — головка датчика; 3 — дополнительный экран; 4 — крышка.

Основной рабочей деталью головки датчика (рис. 3) является измерительная пластина, выполненная из кольца 2, к которому приварена проволочная сетка 8. Использована молибдено-никелевая сетка с размерами ячеек $1 \times 1 \text{ мм}^2$ и диаметром проволоки примерно 0,06 мм. Измерительная пластина установлена на изоляционном кольце 5. Она имеет вывод 7, к которому припаивается провод, идущий на разъем. Внутри измерительной пластины вставлен коллектор 4, изолированный от нее кольцом 3. Коллектор имеет вывод 6, к которому припаивается провод, идущий так-

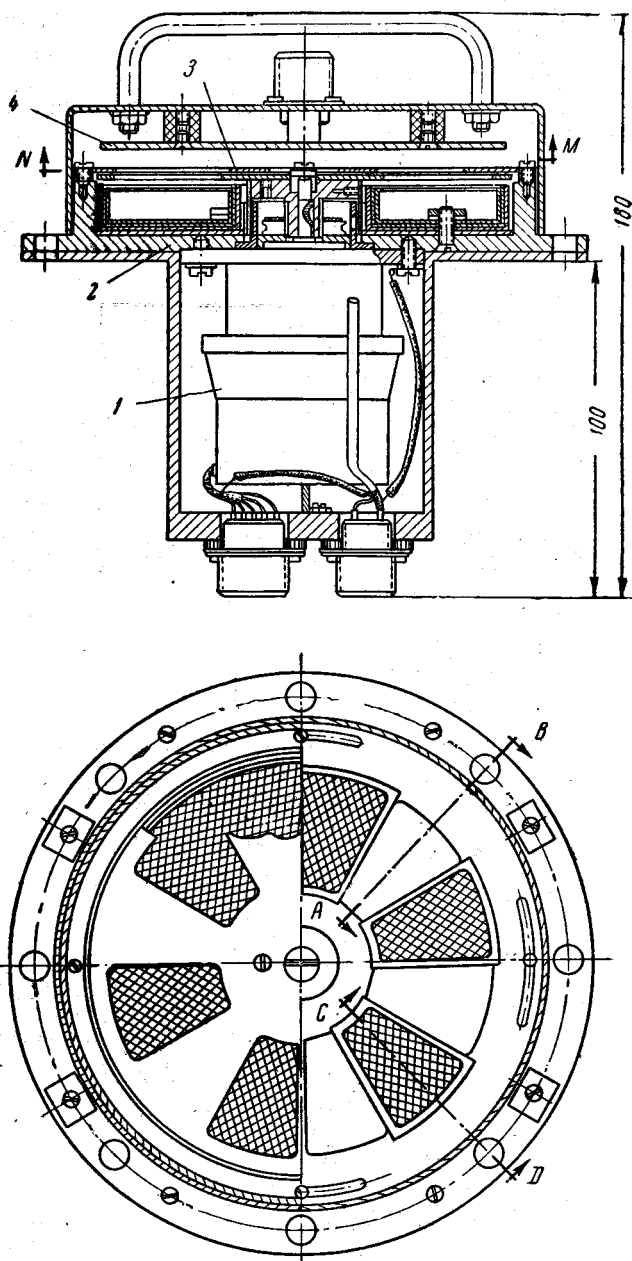


Рис. 2. Конструкция датчика

же к разъему. Вся эта конструкция монтируется на основании 1. К основанию крепится блок мотор-генератора со щетками.

В датчике применяется синхронный мотор-генератор, имеющий скорость вращения 7500 об/мин. Щеточный блок, состоящий из четырех абразивных щеток с примесью медных волосков и контактного кольца, насаженного на фланец экранной пластины, служит для надежного заземления вращающейся системы. Во вращающуюся систему входят ротор мотор-

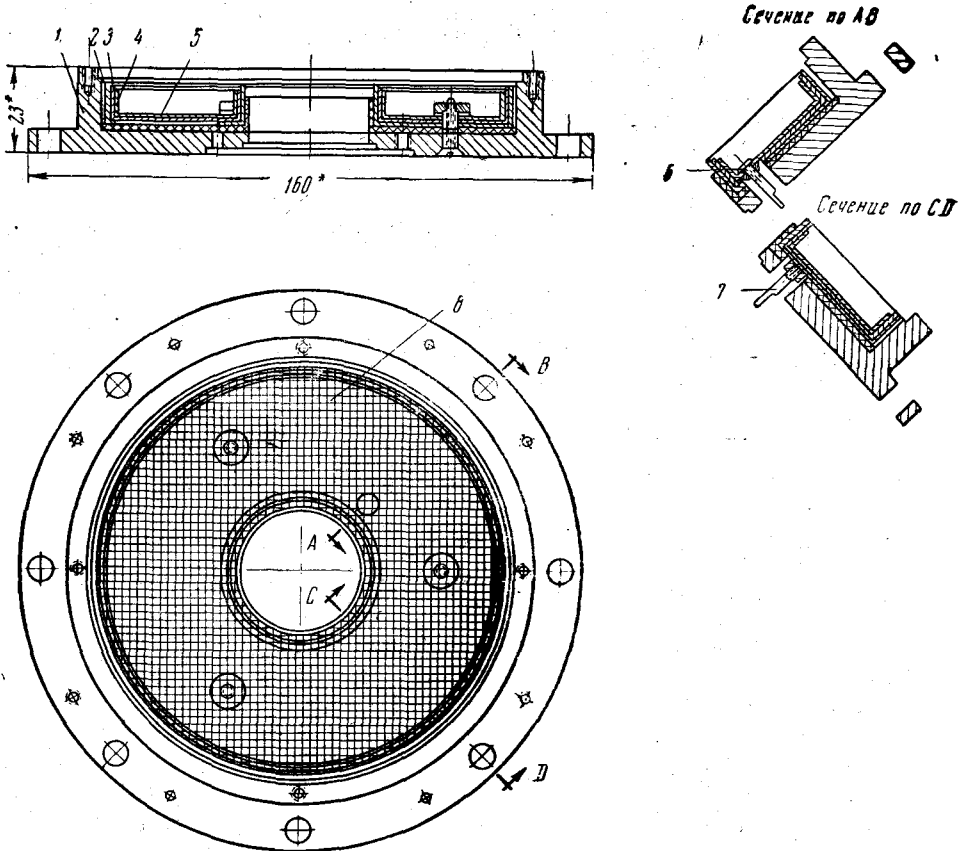


Рис. 3. Конструкция головки датчика

генератора, посаженный на вал мотора, фланец с контактным кольцом, укрепленная на фланце экранная пластина, вид которой показан на рис. 4. Непосредственная насадка фланца с экранной пластиной на вал делает конструкцию компактной. На основании смонтирована дополнительная экранная пластина (рис. 5).

Размеры ячеек и диаметр проволоки сетки, которая применяется при изготовлении измерительной и дополнительной экранной пластин, подобраны таким образом, что эта сетка почти что непроницаема для электростатического поля и обладает большой оптической проницаемостью. Прозрачность сетки такова, что она пропускает около 90% света, падающего на нее. В дальнейших расчетах принято, что токовая проницаемость сетки, т. е. проницаемость ее для потоков заряженных частиц почти равна оптической проницаемости. Дополнительная экранная пластина создает электростатическую тень на измерительной пластине и работа датчика флюксметра уподобляется работе обычного ротационного электростатического флюксметра, так как при вращении основной экранной пластины меняется площадь измерительной пластины, экспонированная в поле. Потоки излучений и заряженных частиц почти не захватываются витками сетки дополнительной экранной пластины, благодаря чему поток заряженных частиц на измерительную пластину и фототок с нее оказываются слабо модулированными вращением экранной пластины. Кроме того,

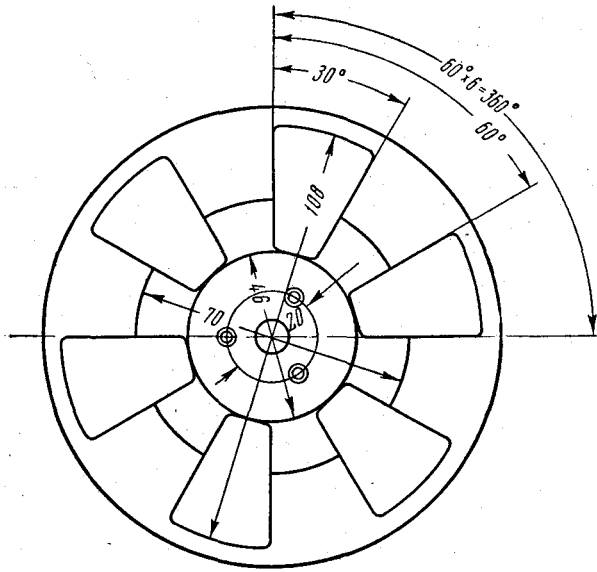
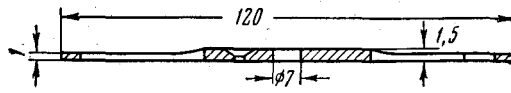


Рис. 4. Основная экранная пластина

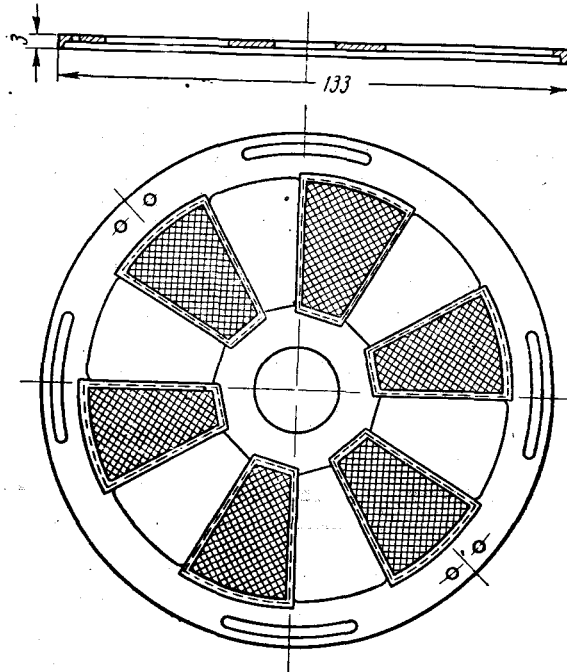


Рис. 5. Дополнительная экранная пластина

абсолютная величина потоков на измерительную пластину мала за счет того, что они почти свободно проходят через ячейки сетки измерительной пластины. Таким образом, уменьшается влияние токов помехи и излучений на работу датчика.

Представляет интерес привести соотношение между «рабочим» током (I_p), создаваемым измеряемым электрическим полем, и «паразитным» током (I_{II}), возникающим из-за отличия (ΔV) потенциала измерительной пластины от равновесного значения. При максимальной концентрации заряженных частиц в ионосфере $n_e \sim 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, потенциале зондирующего тела $\sim 1 \text{ в}$ и напряженности электрического поля в месте установки датчика $E \sim 1 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$:

$$\Delta V \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ в}, \quad I_p \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ а}, \quad I_{II} \sim 10^{-12} \text{ а}.$$

Корпус датчика сделан герметичным. Ввод питающего напряжения, вывод сигнального и опорного напряжений осуществляются через гермовыводы, установленные на резиновых прокладках. Головка датчика закрыта крышкой, на которой установлена градуировочная пластина. На пластину подается постоянное напряжение, необходимое для создания электростатического поля при проведении тарировок.

В этом датчике расстояние между измерительной и экранной пластинами $h_1 = 2 \text{ мм}$, между измерительной и дополнительной экранной пластинами $h_2 = 5,7 \text{ мм}$, между измерительной пластиной и коллектором $h_3 = 10 \text{ мм}$. Рабочая площадь измерительной пластины равняется 45 см^2 . частота экспонирования 750 гц .

В измерительный блок, схема которого представлена на рис. 6, входят два идентичных трехкаскадных усилителя с применением ламп 6Ж1Б, 6Ж2Б, причем первые два каскада построены на RC , а выходной каскад трансформаторный; синхронные детекторы — на лампах 6Х7Б; согласующие устройства для выхода на телеметрию — на 6Ж2Б.

Кроме того, в схему измерительного блока входят два катодных повторителя на 6Ж2Б, использовавшиеся для измерения постоянных токов, текущих на коллектор датчиков; входное сопротивление катодных повторителей равно $\sim 5 \text{ мом}$. Диапазон измерений плотности тока на коллектор в приборах равен $\pm 3 \cdot 10^{-8} \text{ а} \cdot \text{см}^{-2}$, порог чувствительности — $10^{-9} \text{ а} \cdot \text{см}^{-2}$. Для питания измерительного блока используется постоянное напряжение. Это напряжение поступает на стабилизатор напряжения, собранный на транзисторах П4Б и стабилитронах. Стабилизированное напряжение используется для питания накала ламп и питания преобразователя постоянного напряжения, собранного на П4Б (или П-203) и повышающего постоянное напряжение примерно до 200 в . Последнее напряжение используется для питания анодов и экранных сеток ламп. Напряжение, питающее выходные каскады усилителей и катодные повторители, стабилизируется стабилитроном СГ5Б. Этим достигается устойчивая работа выходного каскада усилителя и каскадов-усилителей постоянного тока, каковыми являются катодные повторители. Для контроля работы прибора в полете при помощи реле $P1$ и $P2$ на вход усилителя через делитель, образованный сопротивлениями R_9 и R_{10} (R_{44} и R_{45}) емкостью C_3 (C_{20}) и сопротивлением входной цепи усилителя, время от времени подавалось переменное напряжение, создаваемое электромагнитным генератором. Это напряжение создавало на выходе согласующего устройства напряжение, эквивалентное напряженности электростатического поля примерно $1 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$.

Основные особенности примененной усилительной схемы сводятся к следующему. Влияние токов помехи ослаблено в 250 раз (с учетом конструкции датчика). Коэффициент усиления схемы был равен $5 \cdot 10^5$,

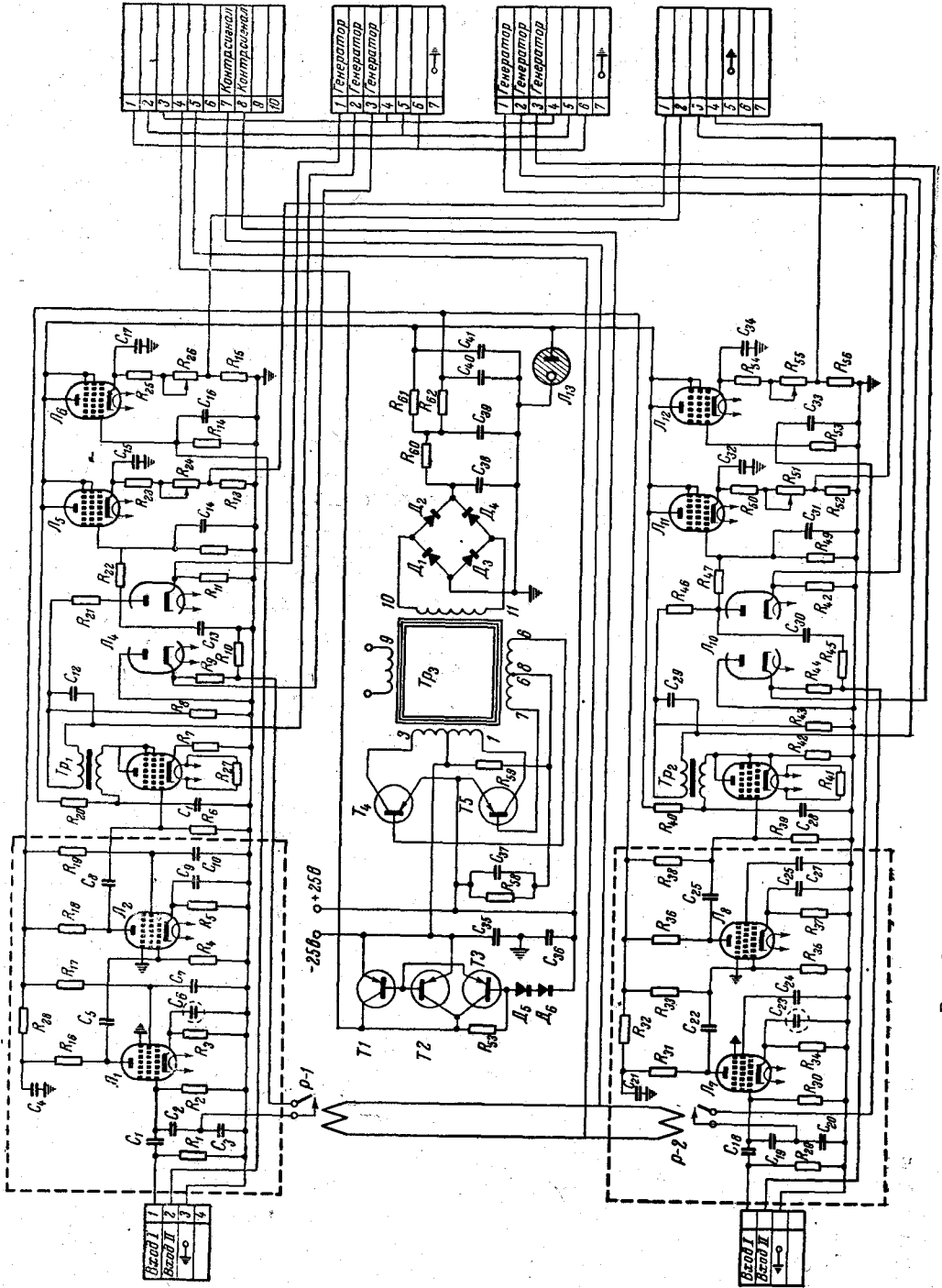


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема измерительного блока

входное сопротивление усилителя ~ 10 ком. В соответствии с требованиями к измерениям фазовый сдвиг напряжения сигнала, создаваемый усилителем, мало изменялся в рабочем диапазоне частот, так при изменении частоты от 690 до 765 гц фазовый сдвиг сигнала менялся на $\sim 10^\circ$.

На входе усилителя были установлены высокочастотные фильтры для предотвращения попадания в схему напряжений высокой частоты, наводимых различного рода передающими устройствами. Схема входа с фильтрами представлена на рис. 7.

Диапазон измерений приборов составлял $\pm 2 \div 3$ в · см⁻¹.

Для подавления токов помехи используется синхронный детектор. Теория показывает [5], что напряжения сигнала и помехи сдвинуты друг относительно друга на входе прибора примерно на 90° . Точная настройка синхронного детектора на напряжение сигнала, осуществляемая в лабораторных условиях, стабильности частоты питания двигателя, правильно подобранная фазовая характеристика усилителя позволяют считать, что синхронный детектор настроен на напряжение сигнала с точностью $\sim 4^\circ$. Таким образом, лишь $1/15$ часть переменной составляющей напряжения помехи на входе прибора эффективно влияет на величину выходного напряжения.

Стабильность работы прибора в целом определяется устойчивостью «нулевых» показаний прибора и стабильностью коэффициента усиления.

Один из факторов, способных вызвать неустойчивость «нулевых» показаний, — изменение контактной разности потенциалов — подвергался специальному исследованию. Для этого датчик помещался в термокамеру, температура которой менялась в диапазоне $-30 \div +90^\circ$ С. Изменение контактной разности потенциалов в пересчете на напряженность не превышало в этих испытаниях $0,1$ в · см⁻¹.

Во время проведения всех испытаний производилась проверка чувствительности и фиксировались «нулевые» показания (показания при $E = 0$ в · см⁻¹). Многочисленные испытания показали, что при непрерывной работе прибора в течение примерно 30 мин. после пятиминутного прогрева, нулевые показания в среднем остаются без изменений. В отдельных случаях, когда происходят изменения, их величина не превышает $0,1$ в, что соответствует примерно $0,1$ в · см⁻¹. От испытания к испытанию «нулевые» показания меняются. Максимальное изменение не превышает $0,3$ в, причем, как правило, изменения не превышают $0,15$ в.

Стабильность коэффициента усиления прибора можно определить, используя изменения калибровочного сигнала во время полета. Максимальные отклонения калибровочного сигнала от среднего не превышали 7%. Средние значения калибровочного сигнала для одного из приборов в полете и при наземных испытаниях равнялись, соответственно, для первого канала — $1,63$ и $1,78$ в · см⁻¹, для второго канала — $1,23$ и $1,33$ в · см⁻¹.

Таким образом, на основании вышеизложенного для всех приборов максимальные значения нестабильности «нулевых» показаний равны $0,3$ в · см⁻¹ и нестабильности коэффициента усиления — 10%. Следует иметь в виду, что за время полета геофизической ракеты изменения нулевых показаний не могут превысить $0,1$ в · см⁻¹. Лабораторные измерения показывают, что токи измеряются с ошибкой, не превышающей 10^{-9} а · см⁻².

Для расчета общей ошибки измерения следует учесть еще ошибки метода. Они рассчитывались в соответствии с соображениями, высказанными

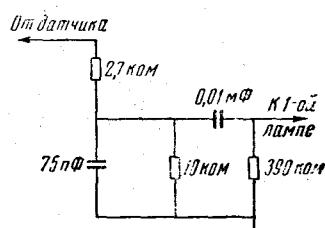


Рис. 7. Входная цепь

в [2]. При расчете ошибок учитывался ток помехи, влияние объемного заряда, проникающего в пространство между рабочими пластинами датчика, неопределенность в знании толщины слоя объемного заряда у поверхности датчиков. В совокупности с учетом предыдущего рассмотрения приборной ошибки ошибка измерений ΔE равна

$$\Delta E = \pm 0,25 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1} \pm 0,25 E_{\text{изм}},$$

где $E_{\text{изм}}$ — измеренное значение напряженности. Несмотря на сравнительно большую величину ошибки измерений (ΔE), описанная аппаратура может применяться для измерений напряженности электрического поля у поверхности зондирующих тел, летящих в ионосфере [2]. Причем при таких измерениях можно оценить величину напряженности внешнего электрического поля в ионосфере [2, 6]. Нами рассматривался прибор, созданный для ракетных измерений применительно к условиям верхней атмосферы. Однако следует иметь в виду, что приборы рассмотренного типа могут быть применены в средах, где действуют излучения, способные вызвать фотоэмиссию, и существуют потоки заряженных частиц. В разработке прибора приняли участие В. Г. Бородулина и В. А. Крайнев, которых авторы благодарят за помощь.

Дата поступления
26 февраля 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский. *Астрон. ж.*, 37, № 4, 716, 1960.
2. И. М. Имянитов, Г. Л. Гдалевич, Я. М. Шварц. Сб. «Искусств. спутники Земли», вып. 17. Изд-во АН СССР, стр. 66.
3. D. V. Beard, F. S. Johnson. *J. Geophys. Res.*, 65, No. 1, 1, 1960.
4. К. И. Грингауз, М. Х. Зеликман. *Усп. физ. н.*, 63, № 1 б, 239, 1957.
5. И. М. Имянитов. *Усп. физ. н.*, 63, № 1 б, 267, 1957.
6. А. В. Гуревич. *Космич. исслед.*, 2, № 2, 232, 1964.