

Рис. 2. Пример записей зондовых характеристик, контрольных пилообразных напряжений (ПН), индикации шкал и длительности пилообразных напряжений (КПН), полученных по телеметрическим каналам

Рис. 3. Вид нормированных на ток насыщения вольт-амперных характеристик, полученных при помощи плоской ионной ловушки ПЛ-40А в ночное время на средних широтах, иллюстрирующих наличие ионов разных масс. Каждая последующая кривая смещена на 1,5 В

Во входном каскаде УПТ зондовых токов используется транзистор с изолированным затвором 2П303Г. Во входном каскаде УПТ токов плоского анализатора используются электрометрические лампы ЭМ-10. Переключение шкал УПТ осуществляется путем параллельного подключения соответствующих резисторов с помощью реле РЭС-59А.

Для получения пилообразных напряжений в приборе используется модуляционный метод. Принцип действия задающего генератора основан на заряде конденсатора постоянным током. Величина зарядного тока стабилизируется схемой на полевом транзисторе. Задающий генератор может работать в автоколебательном режиме или синхронизироваться импульсами +5 В с периодом повторения 4 с. Модулятор построен по схеме двухтактного трансформаторного усилителя, напряжение питания на него подается от задающего генератора. Задающий генератор высокой частоты собран на микросхеме 1УТ401В. Частота генератора примерно 75 кГц. Необходимые пилообразные напряжения получают с трансформаторных выходов ГПН. На отдельный телеметрический выход прибора в течение 3,6 с нарастания пилообразного напряжения от ГПН поступает сигнал (уровень 6 В) индикации пилообразного напряжения, который может быть использован для облегчения автоматизированной обработки зондовых характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гдалевич Г. Л., Губский В. Ф., Дмитриева И. Д. Высотное распределение электронной температуры по опытам 1965 г. на геофизических ракетах.— Космические исследования, 1967, т. 5, вып. 3, с. 456.

2. Чапкин С. К., Петрунова М. Х., Иванова Т. Н. Прибор П-2 для измерения параметров плазмы вблизи искусственного спутника Земли.— Научные приборы СЭВ, 1976, № 11, с. 23.
3. Bettac H.-D., Flemming K., Hiersche K. et al. Satellitenexperiment zur Bestimmung von Elektronendichten und Elektronentemperaturen.— Radio Fernsehen Elektron., 1975, Bd. 24, H. 9, S. 91.

в сб. "Космическое приборостроение" М., Наука 1982

УДК 533.9.07:629.785

ИЗМЕРЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОМОЩИ УСТАНОВЛЕННОЙ НА СПУТНИКЕ «КОСМОС-900» ЛОВУШКИ С «ПЛАВАЮЩИМ» ПОТЕНЦИАЛОМ ВНЕШНЕЙ СЕТКИ

А. П. Беляшин, Г. Л. Гдалевич, В. И. Жданов, В. Д. Озеров

В последние несколько лет для исследования неоднородностей концентрации во всем мире широко стали использоваться ионные ловушки с так называемым «плавающим» потенциалом внешней сетки, который автоматически устанавливается на поверхности изолированного тела, помещенного в плазму [1—4]. На спутнике «Космос-900» в комплексе научных приборов были установлены две сферические трехэлектродные ионные ловушки с «плавающим» потенциалом внешней сетки и электронный блок, обеспечивающий их работу и измерение коллекторных токов ловушек и потенциала внешних сеток относительно корпуса спутника [5].

Внешний вид сферической трехэлектродной ионной ловушки показан на рис. 1. Она представляет собой конструкцию из трех взаимно изолированных электродов — сферического коллектора и двух сферических сеток, укрепленных на короткой металлической штанге. Часть штанги, прилегающая к внешней сетке, электрически соединена с ней (это так называемая охранная секция), остальная часть имеет потенциал корпуса. Охранная секция служит для достижения большей однородности поля вокруг внешней сетки ловушки.

Внешняя сетка с радиусом $r_d = 3$ см представляет собой прочную металлическую оболочку с круглыми перфорированными отверстиями, плотно размещенными по всей ее поверхности. Внутренняя сетка, называемая также «антифотоэлектронной», состоит из ряда меридиональных витков тонкой проволоки, натянутой на сферический проволочный каркас. Ее назначение — заливание паразитного тока фотоэлектронов с коллектора. Результирующая прозрачность системы двух сеток $\alpha \approx 53\%$.

Благодаря отрицательным потенциалам (–80 и –100 В), поданным соответственно на коллектор и внутреннюю сетку относительно корпуса ИСЗ, электроны не проникают внутрь ловушки на значительное расстояние, а положительные ионы, диффунди-

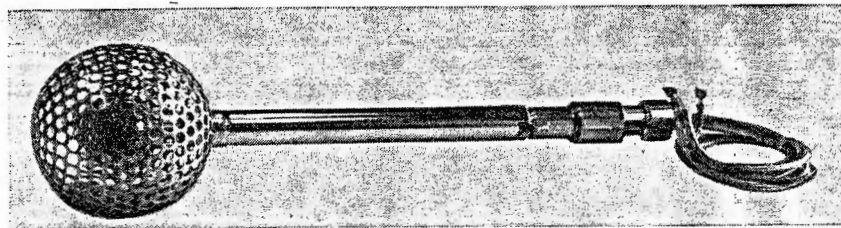


Рис. 1. Сферическая трехэлектродная ионная ловушка

рующие сквозь внешнюю сетку, ускоряются полем внутренней сетки, проникают сквозь нее, собираются на коллекторе и порождают в его цепи коллекторный ток, пропорциональный концентрации плазмы и зависящий от потенциала внешней сетки и скорости ионного потока.

Лабораторные исследования эффективности конструкции ловушки в электролитической ванне и вакуумной установке показали, что для достижения максимально полного собирания ионов, проникших внутрь ловушки на коллектор, необходимая разность потенциалов между внутренней сеткой и коллектором должна быть около 20 В.

Орбита спутника «Космос-900» располагалась на высотах ~450—560 км, где основную массу ионов составляют сравнительно тяжелые ионы кислорода и его соединений с азотом. Скорость спутника почти на порядок превышала скорость звука и среднюю, наиболее вероятную скорость теплового движения ионов. Поэтому основная часть скорости потока ионов относительно ловушки была обусловлена сверхзвуковым движением спутника относительно плазмы, а другая, обычно меньшая часть, — собственными движениями плазмы — тепловым, колебательным (волновым), дрейфовым, ветровым и т. п.

В режиме «плавающего» потенциала внешняя сетка надежно электрически изолируется от остальных деталей ловушки и спутника. В отличие от потенциала корпуса спутника, подверженного сильному влиянию токовых систем, образующихся на спутнике при взаимодействии его с окружающей средой и волновым излучением Солнца, потенциал изолированной, «плавающей» сетки относительно плазмы, окружающей спутник, устанавливается независимо от потенциала поверхности спутника; оставаясь почти постоянным, близким к нулю и обычно отрицательным, на ионно-сферных высотах области F и ниже — в пределах ± 1 В (небольшая положительная величина его порядка 1 В может возникнуть в условиях очень низкой концентрации плазмы под воздействием фотоэмиссии электронов с поверхности внешней сетки).

Пренебрегая крайне малыми токами, возникающими при измерении потенциала внешней сетки усилителем с высоким входным сопротивлением, и неполной сферичностью конструкции

внешней сетки из-за наличия цилиндрической охранной секции, найдем величину «плавающего» потенциала φ_c изолированной сферической внешней сетки из условия равенства электронного и ионного токов, притекающих на сетку из окружающей плазмы. При этом электронный поток будем считать чисто тепловым, не зависящим от скорости спутника, которая на порядок меньше средней тепловой скорости электронов; однако вследствие сильного направляющего влияния земного магнитного поля на хаотическое тепловое движение электронов их ведущие центры образуют двунаправленный поток, ориентированный параллельно геомагнитному полю. Основная величина ионного потока, которую мы и будем учитывать, обусловлена однонаправленным переносным движением ионов относительно спутника со скоростью, равной скорости движения спутника, на порядок большей средней тепловой скорости ионов (иллюстрацией этого может служить впервые обнаруженное на ИСЗ-3 [6] явление «ионной тени» — наличия конусообразной полости позади движущегося спутника, обедненной ионами).

Для ионного потока площадь S_i рабочей поверхности внешней сетки с учетом ее индивидуальной «прозрачности» $\alpha \approx 0,56$ в проекции на поперечное сечение ионного потока составляет

$$S_i = (1 - \alpha) \pi r_n^2.$$

Для электронного потока рабочая поверхность увеличивается, во-первых, из-за эффекта собирания внутренней поверхностью сетки части тех электронов, которые временно проникли внутрь объема ловушки, но при своем обратном движении (под действием выталкивающего поля внутренней сетки) не попали в отверстие внешней сетки. Во-вторых, собирая электронный поток, внешняя сетка работает двумя взаимно противоположными внешними сторонами. Поэтому

$$S_e = 2[(1 - \alpha) \pi r_n^2 + \alpha(1 - \alpha) \pi r_n^2] = 2(1 - \alpha^2) \pi r_n^2 > 2S_i.$$

Так как, кроме того, средняя скорость электронного потока намного превышает скорость ионного потока, то искомое равенство электронного и ионного токов на внешнюю сетку может быть достигнуто только под воздействием образующегося при этом отрицательного потенциала φ_c , тормозящего электроны.

При вычислении ионного тока можно использовать выражение для тока $I_{i,c}$ положительных ионов с массой m_i , движущихся с одной и той же скоростью V_c к слабо притягивающей сфере с поперечным сечением S_i , имеющее вид линейной зависимости $I_{i,c}$ от φ_c [6]:

$$I_{i,c} = en_i V_c S_i (1 - \varphi_c / \varphi_T),$$

где $\varphi_T = m_i V_c^2 / 2e$ — потенциал торможения ионов. Ток электронов на отталкивающую сферу равен [7]

$$I_{e,c} = en_e \frac{\bar{v}_e}{4} S_e \exp\left(\frac{e\varphi_c}{kT_e}\right)$$

(T_e — температура электронов, k — постоянная Больцмана, $\bar{v}_e = \sqrt{8kT_e/(\pi m_e)}$ — среднеарифметическая тепловая скорость электронов, m_e — масса электрона). Приравняв $I_{i,c}$ и $I_{e,c}$, подставляя найденные величины S_i и S_e и учитывая в силу квазинейтральности ионосферной плазмы на высотах $h > 100$ км равенство $n_i = n_e$, имеем

$$V_c (1 - \varphi_c/\varphi_T) = 0,5 (1 + \alpha) \bar{v}_e \exp(e\varphi_c/kT_e).$$

Например, при средней скорости ИСЗ «Космос-900» $V_c = 7,25$ км/с и $T_e = 2500$ К

$$\lg(1 - \varphi_c/\varphi_T) = 1,52 + 2,01 \varphi_c.$$

В случае атомарных ионов кислорода O^+ , составляющих на высотах полета ИСЗ «Космос-900» преобладающую массу ионов,

$$\varphi_T = 4,4 \text{ В}, \quad \varphi_c = -0,73 \text{ В}, \quad \varphi_c/\varphi_T = -0,165.$$

Эта оценка φ_c произведена без учета фотоэффекта и поэтому справедлива лишь при нахождении ловушки в области оптической тени, создаваемой спутником или Землей. Влияние фотоэффекта приводит к сдвигу φ_c в сторону положительных величин, причем этот сдвиг увеличивается с уменьшением концентрации плазмы и электронной температуры. Оценка его показывает, что при плотности фототока, равной $4 \cdot 10^{-9}$ А/см², переход плавающего потенциала внешней сетки через нуль происходит при

$$n_i = n_e = 1,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}.$$

Так как эта величина n_i находится вблизи нижней границы измеренной на ИСЗ «Космос-900» ионной концентрации, то потенциал внешней сетки ионной ловушки во время измерений мог изменяться от полученного выше значения φ_c до нуля. Поэтому ток положительных ионов на коллектор ловушки $I_{i,k}$ можно принять равным

$$I_{i,k} = \alpha l r_{\text{д}}^2 e n_i V_c,$$

откуда концентрация ионов n_i равна

$$n_i = I_{i,k} / (\alpha l r_{\text{д}}^2 e V_c).$$

Под влиянием небольшой отрицательной величины φ_c вычисленные значения n_i оказываются несколько завышенными. Этот недостаток компенсируется значительными удобствами — простотой и скоростью обработки и возможностью производить непрерывные измерения мгновенных величин концентрации, а также

простотой электронной схемы подачи напряжений на электроды ловушки. Непрерывность наблюдения картины изменения концентрации плазмы во времени и пространстве, характерная для режима измерений с «плавающим» потенциалом внешней сетки, представляет важное преимущество для исследования ионосферных неоднородностей. Кроме того, квазипостоянство «плавающего» потенциала φ_c позволяет измерить потенциал корпуса (ПК) спутника относительно окружающей плазмы (с точностью до величины плавающего потенциала), непосредственно измеряя разность потенциалов V_{c-k} между внешней сеткой и корпусом:

$$\text{ПК} = \varphi_c - V_{c-k} \approx -V_{c-k}.$$

При исследовании ионосферных неоднородностей, образованных колебательными движениями плазмы, может оказаться, что вектор скорости колебаний частиц направлен поперек скорости движения спутника или по крайней мере под острым углом к ней. В этом случае ловушка, до того работавшая в свободном потоке плазмы, будет периодически заходить в «ионную тень» спутника или хотя бы приближаться к ней.

При одновременной работе двух ловушек, расположенных на противоположных сторонах поверхности спутника, периодическим увеличением и уменьшением потока ионов, регистрируемого одной из них, будут одновременно соответствовать уменьшения и увеличения потока, регистрируемого второй ловушкой. Иначе говоря, между колебаниями коллекторного тока, регистрируемые этими ловушками, возникнет разность фаз, свидетельствующая об обнаружении колебаний частиц плазмы, как, например, в эксперименте со сферическими ионными ловушками на третьем искусственном спутнике Земли [8]. Схема эксперимента приведена на рис. 2. Блок электроники (рис. 3), как указывалось выше, вырабатывает все необходимые напряжения для работы ионных ловушек и обеспечивает измерение коллекторных токов и потенциалов внешних сеток ловушек относительно корпуса спутника, а также связь с радиотелеметрической системой (РТС). Диапазон изменения концентрации заряженных частиц вдоль орбиты спутника в различное время суток может изменяться от $\sim 10^2$ см⁻³ (в главном ионосферном провале) до $\sim 10^6$ см⁻³ (днем на экваторе). Поэтому диапазон измеряемых токов был выбран от $-4 \cdot 10^{-10}$ до $+3 \cdot 10^{-8}$ А. Включение в диапазон измеряемых токов небольших отрицательных величин было вызвано потребностью в контроле дрейфа нулевого уровня усилителя и вклада потоков энергичных электронов. Конструктивно электронный блок состоит из трех плат: на плате 2 смонтированы стабилизатор, преобразователь бортового напряжения, вторичные источники питания, на платах 1 и 3 — усилители постоянного тока (УПТ) со схемами управления и схемы (КП) для измерения потенциалов внешних сеток.

УПТ (см. рис. 3) осуществляет линейное преобразование ток — напряжение и предназначен для измерения коллекторного тока

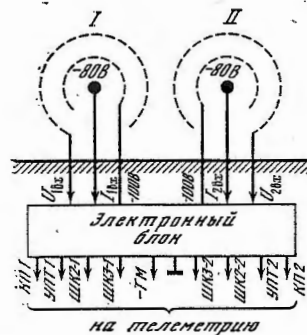


Рис. 2. Блок-схема эксперимента I, II — датчики, заштрихована поверхность спутника.

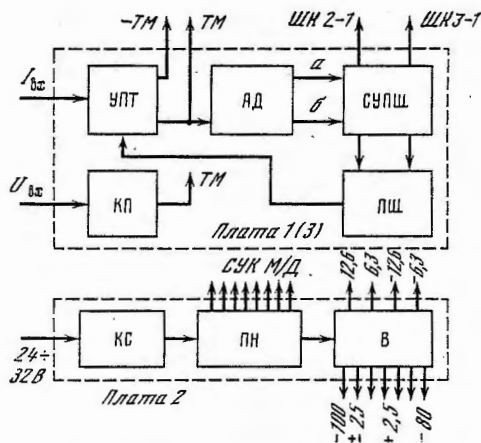


Рис. 3. Блок-схема электронной части блока.

датчика $I_{вх}$. Измеряемый диапазон токов разбит на три поддиапазона:

- 1) от $-4 \cdot 10^{-10}$ до $+7 \cdot 10^{-9}$ А — первая шкала (ТМ выход);
- 2) от $+7 \cdot 10^{-9}$ до $+1,5 \cdot 10^{-7}$ А — вторая шкала (ТМ выход, ШК 2);
- 3) от $+1,5 \cdot 10^{-7}$ до $+3 \cdot 10^{-6}$ А — третья шкала (ТМ выход, ШК 3).

Выходное напряжение усилителя регистрируется радиотелеметрической системой (РТС). Для повышения точности измерений сделана развязка минуса ТМ от корпуса прибора. Амплитудный дискриминатор (АД) выхода УПТ (см. рис. 3) вырабатывает сигналы управления: при увеличении тока до максимального значения УПТ данного поддиапазона (сигнал a) и при уменьшении тока УПТ до минимального значения каждого поддиапазона (сигнал b).

Схема управления переключением шкал (СУПШ) воспринимает сигналы амплитудного дискриминатора и вырабатывает сигнал управления ключами, которые коммутируют резисторы в цепи обратной связи УПТ. Принципиальная схема электронного блока показана на рис. 4. Схема УПТ выбрана с параллельной отрицательной обратной связью и синхронным детектированием модуляции — демодуляции (М/Д) выходного напряжения для создания гальванической развязки выхода УПТ от корпуса прибора. Для обеспечения высокого входного сопротивления первый каскад выполнен на электрометрических лампах типа ЭМ-10 (Л2 и Л3) по балансной схеме (см. рис. 4). Второй каскад — на полевых триодах типа 2П103 (Т3 и Т4), третий каскад — на микросхеме типа 1УТ401Б (А1). Для обеспечения устойчивой работы модулятора с трансформаторной связью (Тр1) на германиевых

триодах типа МП11А (Т10, Т12) предусмотрен согласующий каскад на транзисторах разной проводимости типа 2Т312Б и 2Т203Г. Весь усилитель вместе с повторителем (Т8, Т9) охвачен отрицательной обратной связью, включающей в себя измерительное сопротивление $R9 + R18$. Величина измерительного сопротивления для каждой шкалы выбрана в соответствии с диапазоном измеряемого тока. Демодуляция сигнала осуществляется триодами типа МП11А (Т13, Т16), фильтрация — конденсатором типа КМ-6 емкостью 1 мкФ. Сигнал управления ключами М/Д (Т10, Т12, Т13, Т16) в виде меандра с частотой $f \cong 5$ кГц поступает с отдельных обмоток трансформатора преобразователя напряжения, причем каждому ключу соответствует определенная обмотка. Амплитудная характеристика УПТ $I_{вх} = f(U_{вх})$ имеет исходный уровень $U_{вх} = 0,3$ В. Для смещения исходного уровня от стабилизированного делителя напряжения на резисторах $R41$ и $R42$, управляемого ключом на транзисторе типа КТ312Б, подается необходимый потенциал смещения на неинвертируемый вход микросхемы типа 1УТ401Б (А2), включенной в режиме масштабного усилителя. Этот каскад также понижает выходное сопротивление УПТ. Через RC-фильтр ($R52, C14$) выходной сигнал поступает на телеметрическую систему.

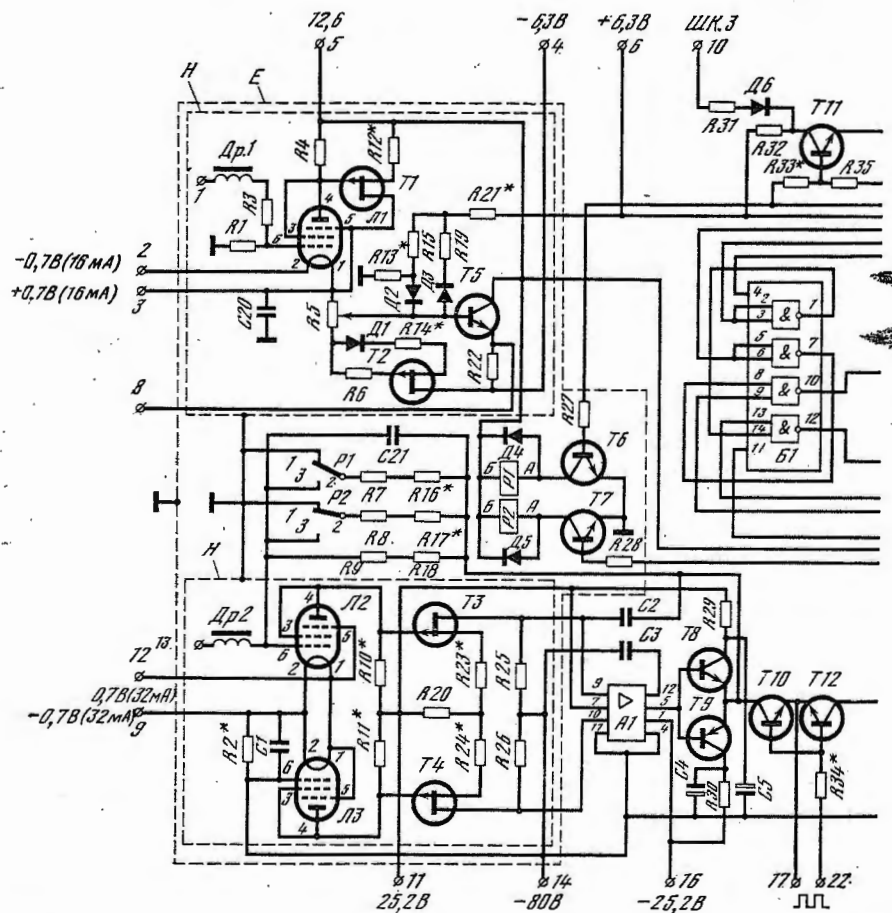
Амплитудный дискриминатор выхода УПТ. С делителя напряжения на резисторах $R50, R51$ часть выходного сигнала поступает на входы двух компараторов, выполненных на микросхемах типа 1УТ401Б (А3, А4). Режим компараторов установлен так, что один из них (А3) вырабатывает сигнал управления схемой переключения шкал при увеличении выходного сигнала до $U_{вх} = 6$ В, другой (А4) — при изменении выходного сигнала в сторону уменьшения до достижения $U_{вх} = 0,3$ В. Таким образом, формируются сигналы управления a и b . Эти сигналы снимаются с делителей напряжения соответственно на сопротивлениях $R66, R67$ и $R65, R68$ и поступают в схему управления переключателей шкал.

Схема управления переключателей шкал (СУПШ). Выполнена на логических элементах 1ТК341Б (В1, В2) и 1ЛБ341Б (В1, В2). Сигналы a и b управляют работой схемы переключения, которая, в свою очередь, управляет автоматическим переключением шкал, а также формирует посредством ключей на триодах Т11, Т14 дискретный сигнал, соответствующий номеру шкалы, поступающий на РТС.

Переключатели шкал. Ключ на триоде 2Т312Б (Т7) управляет работой реле (Р2), контакты которого осуществляют переключение измерительного резистора $R8, R17$ для работы УПТ на второй шкале. Сигнал на базу триода Т7 поступает с триггера В1 (10-й вывод). Этот же сигнал управляет ключами на транзисторах Т15 и Т14. При переключении УПТ с первой шкалы на вторую ключ на Т15 выключает напряжение подставки, смещающее исходный уровень на первой шкале; ключ на Т14 формирует дискретный сигнал для РТС, с помощью которого определяется номер шкалы

УПТ. Ключ на триоде 2Т312Б (Т6) управляет работой реле РЭС-59А (Р1). Контакты этого реле переключают измерительный резистор $R7$, $R16$ для работы УПТ на третьей шкале. Сигнал на базу триода Т6 поступает с триггера В2 (10-й вывод). Этот же сигнал управляет ключом на триоде Т11, который формирует дискретный сигнал для третьей шкалы, подаваемый на РТС.

Повторитель напряжения КП. Осуществляет преобразование сигнала «плавающего» потенциала $U_{вх}$ в положительное напряжение низкоомного выходного канала, изменяющееся в пределах от 0 до +6,7 В при $U_{вх} = -3 \div +10$ В. Для обеспечения высокого входного сопротивления (> 10 ГОм) КП выполнен на электрометрической лампе типа ЭМ-10 (Л1) по схеме усиленного повторителя с источником тока (на полевом триоде 2П103Б — Т2) в цепи катода этой лампы. Каскад на транзисторе П307В (Т5) понижает выходное сопротивление КП. Диоды Д2 и Д3 ограничивают выходное



напряжение, поступающее на РТС с эмиттера Т5, до необходимого уровня.

Ключевой стабилизатор (КС). Обеспечивает стабилизацию напряжения на уровне +20 В (при изменении входного напряжения в пределах 24—32 В) для питания преобразователя напряжения. Стабилизатор выполнен по схеме с последовательным регулирующим элементом на транзисторе 1Т906А (Т3) по релейному принципу, т. е. без задающего генератора, с использованием автоколебательного режима. Это дает возможность получить малый вес и более высокий КПД стабилизатора. Сигнал, воздействующий на базу регулирующего ключевого элемента (Т3), изменяет скважность его переключений, поддерживая постоянным выходное напряжение. Для повышения коэффициента стабилизации схема сравнения на транзисторах П307В (Т2, Т4) питается напряжением, которое снимается со вторичной обмотки трансформатора-преобра-

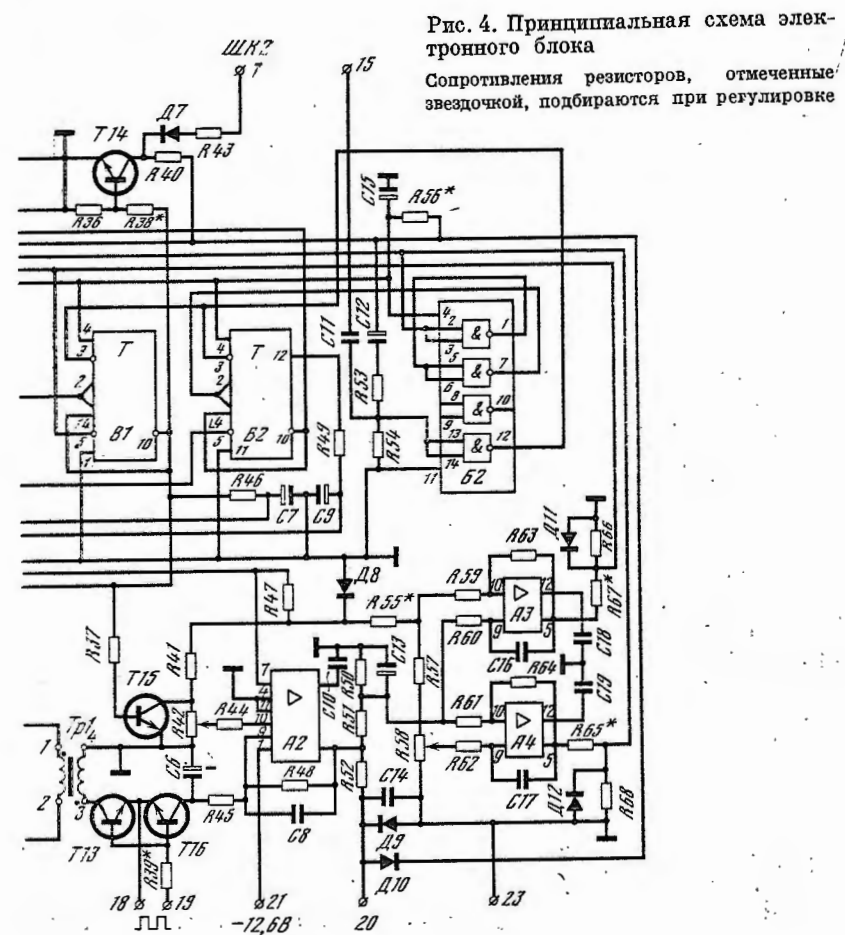


Рис. 4. Принципиальная схема электронного блока
Сопротивления резисторов, отмеченные звездочкой, подбираются при регулировке

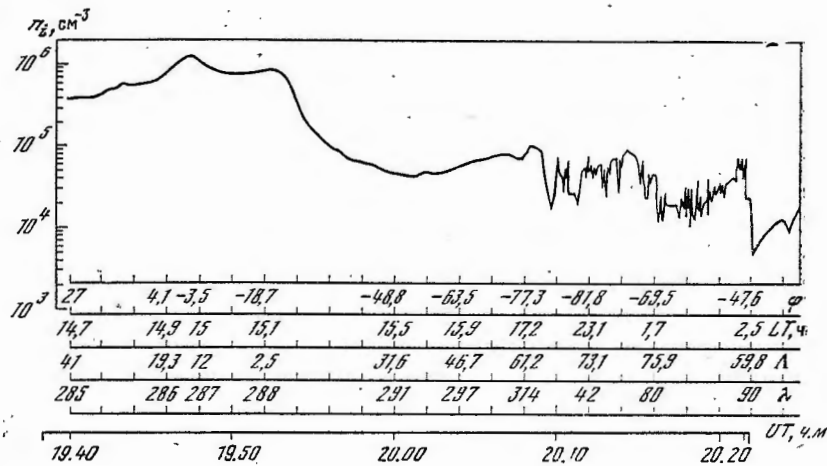


Рис. 5. Пример результатов измерения концентрации положительных ионов, полученных при помощи сферических ионных ловушек с «плавающим» потенциалом внешней сетки, установленных на спутнике «Космос-900» φ — географическая широта в градусах, LT — местное время в часах, Λ — инвариантная широта в градусах, λ — географическая долгота в градусах

зователя. Выходное напряжение фильтруется LC-фильтром (C11, C12, Др3, C15, C16). Транзистор Т1 (1Т906А) включен по схеме диода и служит для предотвращения выхода из строя стабилизатора при неправильной полярности входного напряжения питания. Сглаживающие входные LC-фильтры (Др1, C2 и Др2, C3) предотвращают прохождение импульсных помех в цепь питания со стороны стабилизатора.

Преобразователь напряжения (ПН). Выполнен по схеме с независимым возбуждением на транзисторах 1Т906А (Т6, Т7). Частота преобразования $f \cong 4 \pm 5$ кГц. Цепочка C14, R13, R14, R15, C19 служит для возбуждения преобразователя в первый момент его подключения к источнику питания. Преобразователь может работать в режиме синхронизации. Синхроимпульс поступает через повторитель (Т9) и ключ (Т8) на базу транзистора преобразователя.

Выпрямители (В). Выполнены по мостовым и двухполупериодным схемам с RC-фильтрами. Количество вторичных источников напряжения обеспечивает питание всех узлов блока электроники и электродов датчиков.

Общие технические данные электронного блока. Нестабильность амплитудных характеристик УПТ в основном определяется типом измерительного резистора, в диапазоне 0—40° С не превышала 4%. Постоянная времени $5 \cdot 10^{-3}$ с. Дрейф нуля усилителя за время работы не превышал 0,1 В. Потребляемая мощность 3,2 Вт. Масса 2,6 кг. Габариты (с разъемами и лапками) 262 × 194 × 130 мм. Прибор работал все время активного существо-

вания спутника с 30 марта 1977 г. по 10 октября 1979 г. На рис. 5 показаны некоторые результаты, полученные при помощи описываемого прибора (16.09.1977 на орбите 260). Из рисунка видно, что все особенности широтного распределения концентрации положительных ионов n_i регистрируются в эксперименте (экваториальная аномалия в ночное и дневное время на географических широтах $\varphi \approx -30 \div +30^\circ$, главный ионосферный провал на инвариантных широтах $\Lambda \sim 60^\circ$, пики концентрации в полярных областях). Наименьшие размеры измеряемых неоднородностей концентрации заряженных частиц $n_i = n_e$ ионосферной плазмы ограничиваются лишь возможностями телеметрической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hanson W. B., Sanatani S., Zuccaro D., Flowerday T. W. Plasma measurements with the retarding potential analyzer on Ogo 6.— J. Geophys. Res., 1970, vol. 75 (28), p. 5483.
2. Sagalyn R. C., Smiddy M., Ahmed M. High-latitude irregularities in the topside ionosphere based on ISIS 1 thermal ion probe data.— J. Geophys. Res., 1974, vol. 79 (28), p. 4252.
3. Грингауз К. И., Гдалевич Г. Л. Исследования в ионосфере при помощи ИСЗ «Космос-378». Ч. 1. Задачи и методы исследования.— Геомагнетизм и аэронавигация, 1974, т. 14(6), с. 937.
4. Clark D. H., Raitt W. J. The global morphology of irregularities in the topside ionosphere, as measured by the total ion current probe on ESRO-4.— Planet. Space Sci., 1976, vol. 24, p. 873.
5. Грингауз К., Тверской Б. Лаборатория в магнитосфере.— Правда, 1977, 3 апр.
6. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д. Результаты измерений концентрации положительных ионов в ионосфере методом ионных ловушек на третьем советском спутнике Земли.— В кн.: Искусственные спутники Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1961, вып. 6, с. 63.
7. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. 1. Общие вопросы электродинамики газов. М.; Л.: ГИТТЛ, 1952, с. 262.
8. Озеров В. Д. Указания на наличие колебаний плазмы в ионосфере по данным ионных ловушек. М.: Изд-во РТИ АН СССР, 1965, вып. НТ. 7465-129, с. 2.