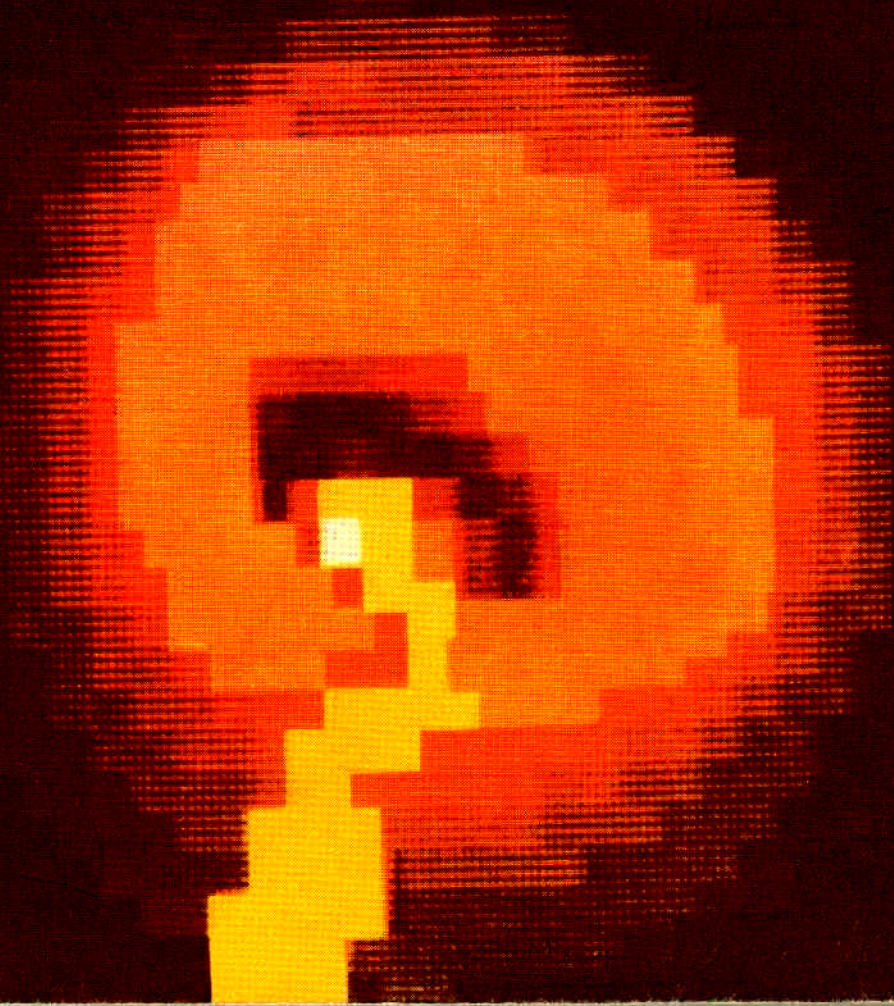


НАУЧНАЯ  
АППАРАТУРА  
для  
КОСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



# НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ответственный редактор  
В.М. БАЛЕБАНОВ



МОСКВА "НАУКА"  
1987

**Научная аппаратура для космических исследований.** М.: Наука, 1987. 185. с.

В сборнике рассмотрены основные принципы создания научной аппаратуры для космических исследований в области физики плазмы, планетных атмосфер, астрофизики, разработанной ИКИ АН СССР совместно с кооперацией других институтов АН СССР и ведомственными организациями. Описаны новые или усовершенствованные методы решения актуальных проблем научного космического приборостроения при подготовке текущих и перспективных программ исследований.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников, а также студентов и аспирантов.

**Редколлегия:**

*В.М. Балебанов* (председатель), *Р.А. Сюняев*,  
*И.А. Струков*, *К.И. Грингауз*, *Э.В. Воронцова*,  
*Т.К. Бреус* (отв. секретарь)

#### **НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Утверждено к печати ордена Ленина Институтом  
космических исследований Академии наук СССР*

Редактор издательства *Е.В. Попова*  
Художественный редактор *М.Л. Храпцов*  
Технический редактор *Г.И. Астахова*  
Корректор *Р.Г. Ухина*

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 35239

Подписано к печати 02.06.87. Т – 15521. Формат 60 × 90 1/16  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная  
Усл.печл. 11,5. Усл.кр.-отт. 11,9. Уч.-изд.л. 12,9. Тираж 1150 экз.  
Тип. зак. 2687 Цена 2 р. 60 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"  
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Типография № 9 Союзполиграфпрома, Москва, Волочаевская ул., д. 40

3. Крисилов Ю.Д. Электронная аппаратура космических приборов с зондовыми датчиками // Космическое приборостроение. М.: Наука, 1982. С. 47–71.
4. Корепанов В.Е. Оценка погрешности измерения напряженности постоянного электрического поля методом двойного зонда Ленгмюра // Космич. исслед. 1982. Т. 20, вып. 5. С. 690–699.
5. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 289 с.
6. Гагуа Т.И. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инжекции пучка электронов с высотного зонда. Процессы нейтрализации: Препр. ИКИ № 782. 1983.

УДК 523.9–335.7:629.78

*Ю.Д. Крисилов, В.В. Афонин, Н.А. Барабанов,  
В.В. Безруких, С.Л. Емельянов, Ю.Е. Собченко, В.Н. Старцев*

### **АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СПУТНИКЕ "ПРОГНОЗ-9"**

На космическом аппарате "Прогноз-9" был установлен комплекс аппаратуры Д-211М для измерения физических параметров ионной компоненты холодной плазмы в диапазоне энергий от 0 до 25 эВ путем измерения и последующей математической обработки кривых торможения ионов, получаемых при помощи плоского электростатического анализатора с тормозящим потенциалом. В задачу эксперимента входила также отработка поисковых алгоритмов измерений.

В состав аппаратуры входили электронный блок Д-211М и два плоских анализатора типа ПЛ-40. Анализатор ПЛ-40 описан в [1]. Оба анализатора были установлены на затененной от Солнца поверхности космического аппарата и ориентированы в антисолнечном направлении. Анализатор ПЛ-40 представляет собой плоскую электронно-оптическую систему, состоящую из четырех электродов: трех сеток и коллектора. Потенциалы апертурных сеток обоих анализаторов были равны 0 В, супрессорных сеток – 70 В, коллекторов – 20 В (все потенциалы измерены относительно корпуса аппарата). Потенциал тормозящей сетки одного анализатора принимал 16 фиксированных заранее выбранных значений от 0 до 25 В. Величины потенциала тормозящей сетки второго анализатора выбирались автоматически в зависимости от результатов предшествующих измерений.

Целесообразность теоретического и экспериментального исследований поисковых алгоритмов диктуется следующими соображениями.

На форму кривых торможения  $i_k(U_T)$  существенно влияют функция распределения частиц по скоростям, химический состав плазмы, концентрация  $N$  и температура ионов  $T$ , скорость  $v$  и потенциал космического аппарата  $U_{КА}$ , ориентация ловушки, фоновые потоки частиц с относительно высокими энергиями, вторичная эмиссия частиц элементами конструкции спутника, характеристики аппаратуры и другие факторы. Поэтому выбор фиксированных величин  $i_{ki}$ , при которых должны измеряться токи  $i_{ki}$ , приходится осуществлять в условиях значительной априорной неопределенности.

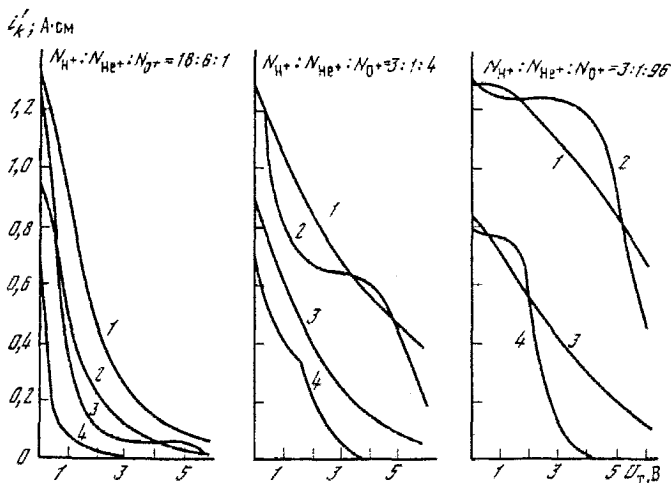


Рис. 1. Нормированные кривые  $i'_k(U_T)$ , рассчитанные по интегральной функции преобразования анализатора при максвелловском распределении ионов  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$   $U_{КА}, i_{\Phi} = 0$ ;  $v = 8$  км/с (кривые 1, 2);  $v = 5$  км/с (кривые 3, 4);  $T = 10^4$  К (кривые 1, 3);  $T = 10^3$  К (кривые 2, 4)

Для иллюстрации на рис. 1 приведены нормированные кривые  $i'_k(U_T)$ , рассчитанные по интегральной функции преобразования анализатора [1] при максвелловском распределении ионов  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  по скоростям и ряде упрощающих допущений: ось анализатора совпадает с направлением вектора скорости  $v$ , потенциал  $U_{КА}$  и фоновый ток коллектора  $i_{\Phi}$  равны нулю и др. Нормировка проводилась по формуле  $i'_k = 10^{13} i_k / N_{эфф} k_{п}$ , где  $s_{эфф}$ ,  $k_{п}$  — эффективная площадь коллектора и коэффициент прозрачности анализатора.

Как видно из рис. 1, три фактора из перечисленных (отношение концентраций отдельных сортов ионов, величины  $v, T$ ) настолько изменяют характер кривых  $i_k(U_T)$ , что при любом фиксированном наборе значений  $U_{T_i}$  в заданном диапазоне 0–25 эВ многие из результатов измерения величин  $i_k(U_T)$  будут иметь весьма низкую информационную ценность.

Очевидно, что в условиях, при которых должны измеряться кривые 4 (см. рис. 1, а–в), нет смысла сканировать участок 4–25 В, на котором сигнал ловушки будет подавляться шумами аппаратуры. В то же время при повышенных значениях  $N_{O^+}$ ,  $v, T$  на этом участке можно получить достаточно высокий уровень коллекторного тока. На участке 1–3 В большинство кривых претерпевают значительные изменения и имеют ряд особенностей, но кривая 2 В проходит горизонтально. Участок 0–1 В этой же кривой содержит информацию о всех сортах ионов, а остальная часть — только об ионах  $O^+$ . О свойствах последних трудно судить по начальным участкам кривых при относительно низкой концентрации кислорода, а "хвосты" таких кривых (рис. 1, а) не содержат информацию о легких ионах. Таким образом, в зависимости от рассмотренных условий измерений к локализации величины  $U_{T_i}$  предъявляются различные требования.

В реальных условиях эти требования еще более усложняются. Рис. 2

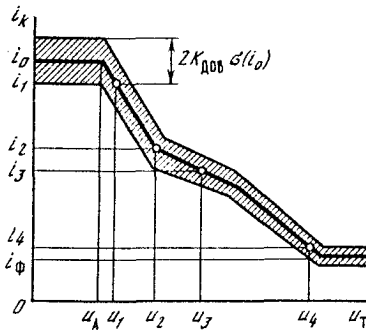


Рис. 2. Влияние на выбор программы измерений величины  $v$ ,  $i_{\Phi}$ , незначительно меняющейся в большинстве случаев за время измерения кривой, а также ошибок, обусловленных быстро меняющимися случайными факторами

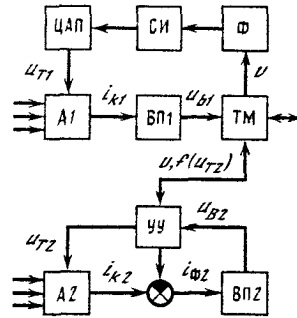


Рис. 3. Упрощенная структурная схема комплекса

иллюстрирует влияние величин  $v$ ,  $i_{\Phi}$ , которые в большинстве случаев незначительно (на  $\pm 20\%$ ) изменяются за время измерения кривой, а также ошибок, вызванных быстро меняющимися случайными факторами (шумы аппаратуры, ошибка квантования и др.), на выбор программы измерений. Здесь для конкретности приведена упрощенная зависимость вида 2, б. Область шириной  $2k_{\text{дов}} \sigma(i_k)$ , где  $k_{\text{дов}}$  — доверительный коэффициент,  $\sigma$  — оценка случайной погрешности, вызванной быстро меняющимися воздействиями, покрыта штриховкой. Потенциал  $U_k$  вызывает горизонтальный сдвиг кривых торможения, а ток  $i_{\Phi}$  — вертикальный.

Допустим, что измерение подобной кривой проводится в стационарных условиях, т.е. при неизменных свойствах объекта измерений и неизменном состоянии бортовых систем. Даже в таких условиях невозможно выяснить причину разброса результатов измерений на участке  $0 - U_1$ . Аналогичная ситуация возникает на участках  $U_2 - U_3$  и  $U_T > U_4$ : результат может измениться из-за погрешности измерений и из-за торможения частиц. Нет смысла располагать более одного отсчета на участках насыщения и фонового тока, где  $i_k \geq i_0 - 2k_{\text{дов}} \sigma(i_0)$  и  $i_k \leq i_{\Phi} - k_{\text{дов}} \sigma(i_{\Phi})$ ; целесообразно уменьшать расстояние между абсциссами  $U_{T_i}$  на пологих участках кривой и увеличивать на крутых участках.

По таким принципам осуществляется выбор аргументов  $U_{T_i}$  ( $i = 1, \dots, \dots, 16$ ) во втором блоке ("адаптивном") комплекса Д-211М. Первый блок (неадаптивный) используется в качестве контрольного. Заложенные в нем принципы функционирования реализуются с помощью простых устройств, что обеспечивает его повышенную надежность. Кроме того, полученные от него телеметрические данные при экспресс-анализе удобно сравнивать с результатами проведенных ранее аналогичных экспериментов, в которых использованы фиксированные значения тормозящих потенциалов.

Упрощенная структурная схема комплекса приведена на рис. 3. Первый блок содержит цифроаналоговый преобразователь ЦАП, счетчик импульсов СИб, формирователь Ф, анализатор А1 и вторичный преобразователь ВП1. Формирователь преобразует поступающие с телеметрии ТМ синхронимпульсы в импульсы стандартной формы и амплитуды, а также обеспечи-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4	5	6	8	10	12	17	25

вает гальваническую развязку телеметрии и аппаратуры. С помощью счетчика и ЦАП формируются анализирующие сигналы  $U_{T1i}$  на тормозящей сетке первого анализатора.

В соответствии с классификацией способов анализа частиц [2] в данном блоке осуществлялось сканирование по энергии с переменной нижней и бесконечной верхней границами интервалов анализа. Нижняя граница (с 1-го по 16-й интервал) приведена в таблице.

Моделирование эксперимента по методике, описанной в [2], показало, что такая фиксированная программа в среднем соответствует ожидаемым статистическим характеристикам условий и объекта измерений.

Вторичный преобразователь коллекторского тока  $i_{к1}$  выполнен на базе электрометрического усилителя. Его кусочно-линейная характеристика  $U_{в1}(i_{к1})$ , близкая к логарифмической, формируется путем переключения измерительных резисторов. Погрешность преобразования (с учетом дискретности телеметрического канала) не превышает 10% в диапазоне положительных токов  $i_{к1} = (10^{-11} \div 10^{-7})$  А и отрицательных токов  $i_{к1} = -(10^{-11} \div 10^{-10})$  А. Последние могут возникнуть, например, из-за дрейфа усилителя или из-за попадания на коллектор электронов с  $E_e > 70$  эВ.

Характеристика преобразования показана на рис. 4. Одним из основных источников погрешности измерения величины  $i_{к1}$  является температурный дрейф полупроводниковых элементов, коммутирующих измерительные резисторы. Это приводит к вертикальному смещению точек сопряжения  $u_{c1}$  и  $u_{c2}$ .

В аппаратуре использовано устройство для стабилизации характеристик преобразования [3]. Его упрощенная схема показана на рис. 5. Если выходное напряжение  $u_{в}$  не превосходит ординаты первой точки сопряжения  $u_{c1}$ , то кривизна характеристики  $u_{в}(i_{к})$  равна величине измерительного резистора  $R_{и1}$ . При этом  $u_{c1} = i_0 R_{и1} + u_0$ , где  $i_0$  — ток через транзистор  $v_1$ ,  $u_0$  — напряжение открывания транзистора  $v_2$ . Если  $u_{в}$  возрастает до величины  $u_{c1}$ , то второй измерительный резистор подключается параллельно  $R_{и1}$ , крутизна уменьшается в  $1 + R_{и1}/R_2$  раз и т.д.

Температурный дрейф  $\Delta u_0(T)$  напряжения  $U_0$  (порядка 2 мВ/К) компенсируется соответствующим дрейфом тока  $i_0(T)$ . Резисторы  $R_1 - R_4$  нетрудно подобрать таким образом, чтобы в рабочем интервале температур выполнялось условие компенсации  $\Delta i_0(T) R_{и1} = \Delta u_0(T)$ . При этом достигается указанная выше точность измерительного преобразования.

Время установления сигнала  $u_{в}$  при скачкообразном входном воздействии не превышает 1 с, период синхроимпульса и телеметрического опроса — 5 с. Данный блок работает в реальном масштабе времени, т.е. измерение одной кривой продолжается 80 с.

Устройством, содержащим устройство управления УУ (см. рис. 3), анализатор А2 и вторичный преобразователь ВП2, работает с транспозицией: 16 координат кривой торможения определяются в нем за 4 с, а трансляция

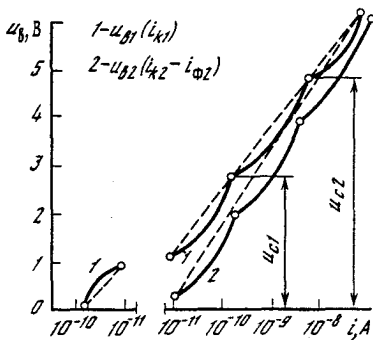


Рис. 4. Характеристика преобразования тока коллектора

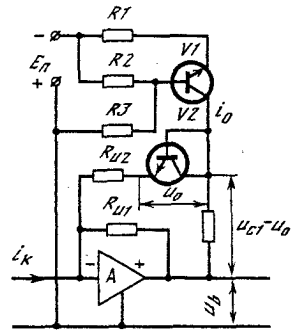


Рис. 5. Упрощенная схема устройства для стабилизации характеристик преобразователя

руются синхронно с данными первого блока в течение 80 с. Это позволяет существенно уменьшить влияние временных вариаций среды на результаты измерений.

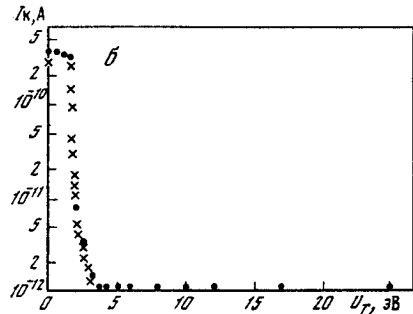
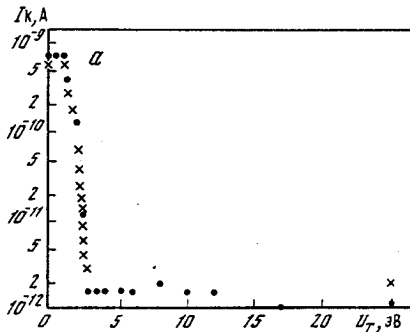
Для повышения точности измерений во втором блоке используется компенсация фонового тока  $i_\phi$  (см. рис. 2). Она осуществляется следующим образом: при максимальном значении  $U_{T_2} = 25$  В измеряется выходной сигнал  $u_{B_2}$  преобразователя ВП2 и запоминается в аналоговом ЗУ, входящем в устройство управления, на время измерения кривой. В этом же устройстве осуществляется обратное преобразование  $U_{B_2} \rightarrow i_{\phi_2}$  и в течение всех последующих измерений из тока анализатора  $i_{k_2}$  вычитается компенсирующий ток. При этом полное используется динамический диапазон вторичного преобразователя, а его характеристика проходит через начало координат (см. рис. 4). Аналогичный способ компенсации фонового тока описан в [4].

После компенсации  $i_\phi$  и измерения разности  $i_0 - i_\phi$  во втором блоке осуществляется последовательное дискретное изменение и оценка разности соответствующих значений  $U_{B_2}$ . В промежуточном запоминающем устройстве хранятся только те абсциссы  $u_{T_i}$  кривой торможения, при которых упомянутая разность достигает заданной величины. Поэтому плотность размещения значений  $U_{T_i}$  пропорциональна производной  $di_k/du_T$  и зависит от особенностей конкретной кривой.

Для уменьшения погрешности хранения измерительной информации во втором блоке использовано динамическое запоминающее устройство с повышенным быстродействием [5]. В этом устройстве элементы утечки запоминающего конденсатора в течение времени хранения включаются между эквипотенциальными точками и ток разряда конденсатора практически равен нулю.

Для повышения чувствительности измерений коллекторных токов ловушек в преобразователях ВП1, ВП2 использованы устройства с МОП-транзисторами. Для защиты входных цепей преобразователей от перегрузок в аппаратуру включены устройства защиты [6], которые охвачены петлей следящей обратной связи и практически не влияют на точность измерительного преобразования.





Р и с. 6. Примеры кривых торможения (энергетических спектров), измеренных прибором в полете на ИСЗ "Прогноз-9"

*a* —  $n_i = 600 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_i = 2600 \text{ К}$ ,  $\varphi = 1,5 \text{ В}$ ; *б* —  $n_i = 480 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_i = 2200 \text{ К}$ ,  $\varphi = 2 \text{ В}$

Космический аппарат "Прогноз-9" был запущен 1.07.1983 г. на высокоэллиптическую орбиту с параметрами: апогей — 700 000 км, период ~ 24 сут. Спутник пересек плазмосферу лишь однажды в начале 1-го витка, в дальнейшем в результате быстрой эволюции орбиты перигей настолько вырос, что плазмосфера Земли осталась вне орбиты, в связи с чем измерения холодной плазмы стали невозможны. Тем не менее во время пролета "Прогноза-9" через плазмосферу был получен экспериментальный материал, достаточный для сравнения двух методов измерения и оценки степени эффективности адаптивного метода.

Примеры кривых торможения (энергетических спектров), измеренных прибором в полете, приводятся на рис. 6. На каждом графике изображены две кривые торможения; точками показана кривая, измеренная "традиционным" (неадаптивным) методом (при фиксированных тормозящих потенциалах), крестиками — адаптивным методом. Из графиков рис. 6 видно, что зарегистрированные кривые соответствуют плазме с весьма низкой температурой: на наклонных участках кривых ток уменьшается приблизительно на 2 порядка при увеличении тормозящего напряжения на 1 В.

Рассмотрение результатов измерения, приведенных на рис. 6, показывает, что при измерениях с фиксированными тормозящими потенциалами наиболее информативный участок кривой торможения — наклонный — описывается 4–6 измерениями (значениями тока) из возможных 16, тогда как остальные 12–10 измерений либо приходятся на горизонтальный участок кривой при потенциалах  $U_T < \varphi/e$  ( $\varphi$  — потенциал космического аппарата относительно окружающей плазмы,  $e$  — заряд электрона), либо соответствует нулевым значениям измеряемого тока. В том и другом случае эти измерения нельзя использовать для определения физических параметров плазмы. В то же время из рис. 6 видно, что адаптивный метод дает возможность для описания наклонного участка использовать 14 значений тока из 16. Оставшиеся два измерения используются для передачи величины суммарного и фонового тока анализатора. Различие величины максимальных токов кривых торможения, измеренных двумя методами, по-видимому, объясняется различием номиналов измерительных резисто-

ров, возникшим в результате их неодинакового строения, или их различными температурными коэффициентами.

Приведенные экспериментальные данные, являющиеся типичными для результатов на "Прогнозе-9", позволяют сделать вывод о том, что адаптивный алгоритм измерения спектров холодной плазмы, реализованный в комплексе Д-211М, позволяет значительно улучшить использование ТМ-канала и повысить достоверность экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Безруких В.В., Волков Г.И., Грингауз К.И., Мокров В.С.* Исследование плазмосферы Земли при помощи ловушек на спутниках "Прогноз" // Проблемы солнечной активности и космическая система "Прогноз". М.: Наука, 1977. С. 184–195.
2. *Крисилов Ю.Д.* Электронная аппаратура космических приборов с зондовыми датчиками // Космическое приборостроение. М.: Наука, 1982. С. 47–71.
3. А.с. 647844 СССР. Усилитель постоянного тока С.Л. Емельянов, Ю.Д. Крисилов, В.И. Старцев, Н.И. Тарасов. Оpubл. в Б.И., 1979. № 6.
4. *Knudsen W.S., Bakke J., Spenner K., Novak V.* Retarding potential analyzer for the Pioneer-Venus orbiter mission // Space Sci. Instrum. 1979. N 4. P. 351.
5. А.с. 911625 СССР. Динамическое запоминающее устройство / А.П. Мосенко, С.Л. Емельянов, Ю.Д. Крисилов, В.Г. Пядышев, В.И. Старцев. Оpubл. в Б.И., 1982. № 9.
6. А.с. 1056058 СССР. Устройство для защиты электрометрического усилителя от перегрузок / С.Л. Емельянов, Ю.Д. Крисилов, В.Г. Пядышев, В.И. Старцев, Ю.Е. Собченко, В.В. Безруких. Оpubл. в Б.И., 1983. № 43.

УДК 621.385

*В.И. Алексеенков, В.С. Калашников,  
Ю.А. Немлихер, А.Ф. Рукавицын, И.А. Струков*

## МАШИННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе использован метод машинного проектирования, базирующийся на восстановлении параметров эквивалентных схем (ПЭС) элементов. На основе разработанных комплексов программ для ЭВМ и методики восстановления ПЭС активных компонентов по результатам измерений их импедансных и шумовых характеристик в достаточно широком интервале частот проведена оптимизация характеристик устройств по заданной системе целевых параметров. Это позволило разработать целый ряд СВЧ-устройств с параметрами, близкими к оптимальным, и среди них: приемный модуль с полосой частот от 0,1 до 2 ГГц и интегральной шумовой температурой  $T_{ш} \leq 180$  К; транзисторные УВЧ с  $T_{ш} < 90$  К на 1,6 ГГц и  $T_{ш} < 200$  К на 5 ГГц;  $p-i-n$ -модулятор с полосой частот от 4 до 6 ГГц; генераторы шума с полосой частот от 0,01 до 4 ГГц и от 4 до 6 ГГц; согласованные детекторные головки с цепями подачи напряжения смещения в СВЧ-тракт и рабочими частотами от 0,01 до 4 ГГц и от 2 до 12 ГГц.