

80-511

5010/2-80



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

20/x-80

13-80-511

А.П.Крячко, Као Дак Хьен

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ  
ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ  
В ЛАБОРАТОРНЫХ ЦИФРОВЫХ  
СИСТЕМАХ СВЯЗИ

1980

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее широкие возможности для моделирования цифровых сигналов, контроля и обработки полученных результатов дает ЭВМ. Однако для этого необходимо создать устройство сопряжения ввода/вывода ЭВМ с приемно-передающей аппаратурой. Это устройство может быть использовано только с какой-то определенной машиной. Специфика испытаний требует частых перемещений аппаратуры, что трудно обеспечить в таких системах. Поэтому ЭВМ целесообразно применять на заключительном этапе испытаний с устройством сопряжения с приемно-передающей аппаратурой и линией связи, с которыми она должна в дальнейшем работать.

Для проверки качества цифровых линий связи обычно применяются различные тестеры, которые выпускаются как промышленностью, так и изготавливаются в условиях лаборатории <sup>/1-3/</sup>. Тестеры позволяют проводить необходимый объем испытаний, не требуют обслуживания и достаточно портативны. В своем составе они могут иметь программируемую память, микропроцессор, а также возможность подключения через стандартные интерфейсы к ЭВМ, различным контроллерам и устройствам ввода/вывода. Это позволяет автоматизировать процессы программирования, обработки и вывода результатов испытаний.

### 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Чтобы уменьшить влияние структуры сигнала на достоверность передачи, для проверки линий связи цифровой поток должен соответствовать передаваемой информации. Этому требованию больше всего отвечает случайная последовательность импульсов, в которой отношение единиц и нулей близко к единице <sup>/4/</sup>.

При исследовании каналов передачи данных можно считать, что передаваемые сообщения конструируются путем последовательного выбора двоичных символов из определенного ансамбля, причем результаты выбора равновероятны и независимы, т.е.  $p(0) = p(1) = 0,5$ . Ансамблем в теории вероятности называется совокупность событий вместе с их вероятностями <sup>/5/</sup>.

Возьмем последовательность длиной  $n$  элементов  $(0, 1)$ . При увеличении  $n$  возрастает вероятность того, что в большинстве

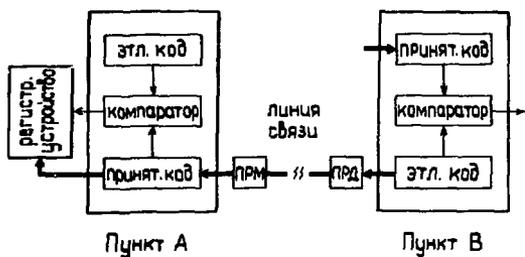


Рис.1. Метод измерения коэффициента ошибок по направлению.

ся достаточным взять  $n=20$ , чтобы считать испытательный сигнал близким к реальному <sup>1/1</sup>.

из всех возможных комбинаций этой последовательности число нулей и единиц распределяется приблизительно поровну. Так, уже при  $n=20$  в 74% всех возможных комбинаций будет от 8 до 12 нулей, т.е. число нулей и единиц отличается от своего наиболее вероятного значения  $0,5n=10$  не более чем на 20%.

На практике оказывается

## 2. СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ <sup>1.3,6-8/</sup>

Испытания проводятся по двум схемам: по направлению и шлейфом. При этом поэлементное сравнение производится в момент поступления очередного элемента на вход детектора <sup>1.3,6/</sup> или после запоминания некоторого фиксированного числа элементов <sup>2/</sup>.

### 2.1. Испытания по направлению

Схема испытаний представлена на рис.1. Эта схема более предпочтительна, хотя и требует двойного комплекта испытательного оборудования.

### 2.2. Испытания по схеме шлейфом

Линия связи включается, как показано на рис.2а. Испытательная и приемно-передающая аппаратура обычно размещаются на одном конце линии. Здесь возможны два случая. Поступающий с линии код сравнивается: 1/ с известным эталонным кодом - рис.2а; 2/ с исходным кодом, задержанным /с помощью регулируемой задержки/ на время распространения в линии туда и обратно - рис.2б. В последнем случае исходный код может быть действительно случайным <sup>1/6/</sup> и вырабатываться в момент передачи.

Недостатком испытаний по схеме шлейфом является двойная длина линии, что часто не отражает реальной ситуации. При этом трудно интерпретировать результаты испытаний для характеристики передачи данных по линии нормальной длины. Сказанное час-

точно относится и к случаю промежуточной регенерации сигналов в пункте В - рис.2в, дающем возможность сохранить необходимую скорость передачи.

### 3. СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

#### 3.1. Таблицы случайных чисел

Требуемую последовательность случайных чисел можно брать из таблиц равномерно распределенных случайных чисел <sup>/9-11/</sup>. Эти таблицы могут быть результатом регистрации определенных физических процессов <sup>/9/</sup>. Однако использование таблиц не всегда удобно. В таких случаях применяют последовательность псевдослучайных чисел, или псевдослучайную последовательность /ПСП/.

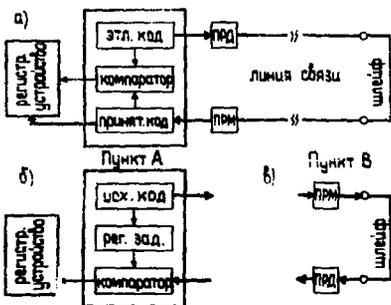


Рис.2. Метод измерения коэффициента ошибок по схеме шлейфом: а/ с известным эталонным кодом; б/ со случайным кодом; в/ с промежуточным регенератором.

#### 3.2. Последовательность псевдослучайных чисел

Она формируется детерминированным методом, т.е. по определенным алгоритмам, но удовлетворяет статистическим тестам проверки на случайность. Процесс формирования является периодическим. Однако длина периода последовательности может быть сделана достаточно большой, чтобы для практического применения числа последовательности можно было считать случайными <sup>/13,17,18/</sup>.

Существуют два основных способа формирования последовательности псевдослучайных чисел: программный и с помощью генераторов.

##### 3.2.1. Программный метод

Программный метод формирования последовательности псевдослучайных чисел подробно описан в <sup>/9/</sup>. Такие программы обычно находятся в системах машинного программного обеспечения ЭВМ.

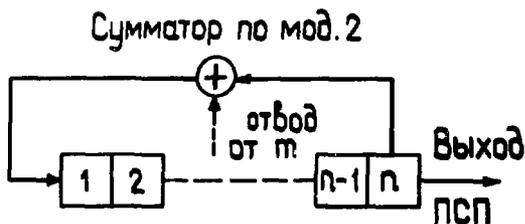


Рис. 3. Структурная схема генератора псевдослучайных последовательностей.

### 3.2.2. Формирование псевдослучайных чисел с помощью генераторов

Основой таких генераторов является сдвиговый регистр, к которому добавлены схемы сложения /сумматоры/ по модулю два. Входы сумматора подключаются к разным разрядам сдвигового регистра. Структурная схема генератора ПСП представлена на рис. 3. Сумматоры могут располагаться также между разрядами регистра<sup>/13,18/</sup>. Максимальная длина двоичной последовательности или период линейного кода, который можно получить на основе  $n$ -разрядного сдвигового регистра, равен  $2^n - 1$ . Хотя регистр может находиться в  $2^n$  различных состояниях, нулевое состояние исключается с помощью логических схем<sup>/12/</sup>. Иначе, попав в это состояние, генератор не сможет из него выйти<sup>/13,17,18/</sup>. При нелинейной обратной связи получают нелинейные ПСП с  $2^n$  состояниями и равным числом 1 и 0<sup>/18/</sup>.

Для  $n$ -разрядного регистра при использовании всех возможных комбинаций отводов в цепи обратной связи количество генерируемых последовательностей максимальной длины будет равно  $[\Phi(2^n - 1)]/n$ . Здесь  $\Phi(2^n - 1)$  - функция Эйлера<sup>/14,15,17/</sup>, т.е. количество целых чисел, меньших  $(2^n - 1)$ , взаимно простых /неделимых/ с ним, включая 1<sup>/18/</sup>. Если, например,  $n=6$ , то  $2^n - 1 = 63$ . Тогда количество чисел, меньших 63, и с ним - взаимно простых чисел, будет 36 и  $[\Phi(2^n - 1)]/n = 36/6 = 6$ .

Для конфигураций генераторов с максимальной ПСП различные начальные состояния регистра дают идентичные, но задержанные последовательности. Для не максимальных конфигураций это будет приводить к различным последовательностям<sup>/9,13,17/</sup>.

### 3.2.3. Генераторы кодовых последовательностей Мерсенна

Интересным типом неделимых чисел являются неделимые числа вида  $2^p - 1$ . Число такого вида может быть неделимым только тогда, когда  $p = p$  - также является неделимым числом. Неделимые числа вида  $2^p - 1$  называются неделимыми числами Мерсенна.

Рассмотрим следующую последовательность  $2, 2^2-1=3, 2^3-1=7, 2^7-1=127, 2^{127}-1, \dots$ , каждый элемент которой является неделимым числом, и если  $p$  - один из ее элементов, то следующий определяется согласно  $2^p-1$ . За исключением первого элемента этой последовательности каждый ее элемент является неделимым числом Мерсенна. Пока неизвестно, выполняется ли эта закономерность для сколь угодно больших неделимых чисел. Самым большим известным в настоящее время числом этого типа считается  $2^{4423}-1/15/$ . Простые числа Мерсенна широко используются для формирования максимальных ПСП в генераторах на основе сдвиговых регистров. В работе /13/ приводится таблица возможных максимальных ПСП, получаемых с помощью регистра, длина которого - простое число от 2 до 89.

### 3.2.4. Свойства максимальных линейных ПСП /13,14,17,18/

Отметим некоторые свойства максимальных ПСП.

Структура серий. Серия - последовательность  $k$  одинаковых символов 0 или 1. Общее число всех серий, состоящих как из нулей, так и из единиц разной длины, равно  $2^{n-1}$ . Каждой серии нулей соответствует серия единиц. Исключение составляет серия из  $n$  единиц и  $(n-1)$  нулей. Общее число серий длиной  $k$  символов равно  $2^{n-k-1}$ , где  $k=1,2,\dots,(n-2)$ . Число серий с увеличением длины уменьшается как степень 2. Половина всех серий  $2^{n-2}$  имеет длину 1 /0 и 1/, четверть  $2^{n-3}$  - длину 2 /00 и 11/ и т.д.

Относительное местоположение этих серий меняется от последовательности к последовательности, но число серий одинаковой длины остается постоянным.

Свойство уравниваемости. Число единиц в ПСП равно  $2^{n-1}$ , а число нулей на один меньше -  $2^{n-1} - 1$ .

Свойство сдвига. Любой циклический сдвиг ПСП на целое число тактов также есть ПСП. Поэтому отсчет периода можно начинать с любого ее места.

Свойство корреляции. При почленном сравнении данной ПСП с любым ее циклическим сдвигом число совпадений отличается от числа несовпадений не более чем на единицу.

Сведения о корреляционной функции и спектральной плотности сигнала ПСП можно получить из литературы /13,17,18/.

	a	b	c	d	a	b	c	d
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	0	1	1	1
3	1	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	0	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	1	0	0	0
6	1	1	0	1	0	1	0	0
7	0	1	1	0	0	0	1	0
8	0	0	1	1	1	0	0	1
9	1	0	0	1	1	1	0	0
10	0	1	0	0	0	1	1	0
11	0	0	1	0	1	0	1	1
12	0	0	0	1	0	1	0	1
13	1	0	0	0	1	0	1	0
14	1	1	0	0	1	1	0	1
15	1	1	1	0	1	1	1	0



Рис. 4. Генерация зеркальных псевдослучайных последовательностей.

### 3.2.5. Формирование обратных связей для получения максимальных ПСП

Для получения многих максимальных ПСП требуется более одного сумматора по модулю 2, а для некоторых чисел разрядов регистра их вообще нельзя получить, используя один сумматор. В работах <sup>/9,14/</sup> приводятся таблицы отводов для обратной связи в зависимости от числа разрядов регистра для схем с одним сумматором. В работе <sup>/18/</sup> имеется таблица, содержащая и другие возможные варианты обратной связи. Однако часто бывает проще увеличить число разрядов регистра, чтобы использовать только один сумматор <sup>/14/</sup>. При формировании максимальной ПСП для обратной связи всегда используется самый старший разряд регистра, поэтому иногда он не указывается в таблицах.

Кроме того, отметим, что невозможно сформировать такую последовательность, когда общее число отводов для обратной связи нечетно. При немаксимальных ПСП можно использовать и нечетное число отводов <sup>/18/</sup>.

Для каждого множества  $(n, \dots, \dots, p)$  обратных связей существует зеркальное множество  $(n, \dots, \dots, p-p)$ . Для двух генераторов, дающих зеркальные ПСП, справедливо следующее. По отношению к единичному /или начальному/ состоянию регистров все остальные комбинации воспроизводятся в обратной последовательности с зеркально отраженными значениями разрядов. Таким же образом изменяются состояния каких-либо одноименных разрядов после серии из  $n$ -единиц. Пример генерации зеркальных ПСП приводится на рис. 4. Зеркальные последовательности идентичны, поэтому в таблицах обычно указывают номера отводов  $m$  обратной связи для прямой последовательности. Номера отводов для обратной последовательности  $(n-m) > m$  не приводятся.

Так как каждое состояние в ПСП встречается только один раз, то для небольшого числа разрядов регистра можно фиксировать

момент появления какого-либо состояния и синхронизовать сигналом, отмечающим этот момент, развертку осциллографа для наблюдения этой последовательности на экране<sup>/18/</sup>. При большом числе разрядов для этой цели можно производить пересчет числа тактовых импульсов генератора, получая один импульс на период последовательности.

Использование псевдослучайных чисел вместо чисто случайных дает важные преимущества, т.к. позволяет производить испытания или делать сравнения в одних и тех же воспроизводимых условиях<sup>/9/</sup>.

В работах<sup>/1,18/</sup> рассматриваются вопросы построения генераторов ПСП на основе теории линейных последовательных модульных цепей, даются ссылки на литературу по этому вопросу и приводятся конкретные примеры построения таких схем.

#### 4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

В обзоре будут рассмотрены приборы фирмы Хьюлетт-Паккард /США/ и аналогичные приборы, выпускаемые в СССР. Их можно разделить на две группы: генераторы слов; эталонные генераторы - детекторы ошибок.

Генераторы слов. Генератор слов воспроизводит цифровую форму сигналов с программируемым содержанием бит. Цифровая информация кодируется нормально таким образом, что высокий уровень или импульс представляют логическую единицу, низкий уровень или отсутствие импульса - логический нуль<sup>/9/</sup>. Генераторы слов вырабатывают также псевдослучайные двоичные последовательности. В генераторах слов используются однополярные коды в возвратом к нулю /ВН/ и без возврата к нулю /БВН/. Цифровой канал в генераторах слов фирмы Хьюлетт-Паккард содержит прямой и инверсный выходы. Генераторы слов могут быть последовательными с одним цифровым каналом или параллельными - с несколькими цифровыми каналами, одновременно вырабатывающими информацию. Они используются для подачи на испытываемую систему известного цифрового эталона.

Псевдослучайные двоичные последовательности и переменные по содержанию цифровые слова широко используются для проверки устройств связи. Все генераторы слов могут программироваться вручную<sup>/19-22/</sup>.

Эталонные генераторы - детекторы ошибок<sup>/19-22/</sup>. Приборы этой группы предназначены прежде всего для работы в системах связи с импульсно-кодовой модуляцией /ИКМ/. Их одно- и двухполярные испытательные коды и частоты соответствуют рекомендациям между-

народного консультативного комитета по телеграфии и телефонии /МККТТ/. Они не только генерируют эталонные коды, но и сравнивают прошедшие через испытываемую систему и поступающие на их вход коды с эталонными.

Длина генерируемой последовательности выбирается такой, чтобы моделировать нормальный информационный сигнал, а по структуре - адекватной чувствительным к этому элементам оборудования /например, схемам восстановления синхронизации/. Для измерений при скоростях 1,5/2 Мбит/с и 6,3/8,4 Мбит/с МККТТ принят эталон  $2^{15}-1$  бит, а для более скоростных систем

Таблица

Генераторы слов, эталонные генераторы - детекторы ошибок

Модель	Макс. част., кГц	Цифр. каналы	Режимы работы		Дистанц. программ. др. возможности
			Слова с побитн. программ., бит	ПСИП $(2^n - 1)$ бит $n =$	
8080	300	1	16, 32, 64	-	Блочн. система
8016A	50	8	32 бита/канал: 8x32, 4x64, 2x128, 1x256, Программн. синхрониз.	-	НР-IV, контроллер; п/к читающ. устройство
8018A	50	2	1. Слов (1-99) Слово (3-32) 2. Слово (3-2048) 3. Чередование слов с ПСИ	9, 10, 15, 20	НР-IV, контроллер
8006	10	2	1 x (4-32) 2 x (2-16)	3 - 16	Внешн. входы, разъем
Г5-55 /24/ СССР	20	2	2 - 16	-	-
Г5-69 /24/ СССР	40	1	2 - 20	3 - 20	Детект. ошибок (?)
3780A эт. ген.- дет. ош.	50	1	16	9, 15, 20	Выход на графопротр., печать
3762A	150	2	2 x 10 2 x 16	10, 15, 23	1. Ген. слов 2. В комплексе с 3763A
3763A дет. ош.	150	1	2 x 10 2 x 16	10, 15, 23	Выход на графопротр., печать
ТДС-806 /25/	10	8	1 x 24 8 x 6	10, 15, 23	Выход на КАМАК, цифр. печать

предложен эталон в  $2^{23}$  -1 бит. Последовательности могут представлять псевдослучайные и программируемые числа. Эти приборы имеют обычно один последовательный выходной канал.

Подсчет ошибок за известное число периодов синхроимпульсов дает частоту ошибок, которая индицируется в десятичной форме дисплеем. Частота ошибок определяется за относительно короткий промежуток времени. Результат считается статически значимым, если он основан на регистрации не менее 100 ошибок. Число периодов синхроимпульсов при этом составляет от  $10^6$  до  $10^{10}$ . Имеется также возможность подсчета общего числа ошибок за определенный промежуток времени.

Катастрофические ошибки в аппаратуре передачи данных могут быть обнаружены путем самопроверки: соединения входа с выходом. Приборы для проверки линий связи могут обнаруживать ошибки, которые не выявляются при самопроверке.

Деградацию приемно-передающей аппаратуры и линий связи обычно трудно обнаружить. Это требует интенсивных испытаний. Чрезмерная частота ошибок является показателем общей деградации линии связи или приемно-передающей аппаратуры. Синхронизация в приборах этого типа осуществляется как от внешних синхроимпульсов, так и автоматически, путем восстановления синхроимпульсов из цифрового потока.

Характеристики рассматриваемых приборов приведены в таблице.

Интерфейс HP-IV полностью совпадает со стандартами IEEE-488, ANSI-МС 1.1 и IEC-625.1<sup>/23,19-22/</sup>. В таблице для сравнения представлены аналогичные приборы, выпускаемые в СССР<sup>/24/</sup>. В нижней графе приводятся данные лабораторного тестера связи ТЛС-806<sup>/25/</sup>, разработанного авторами.

## 5. СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ И КОЭФФИЦИЕНТ ОШИБОК

С увеличением скорости передачи растут межсимвольные переходные влияния. Поэтому важно знать диапазон скоростей передачи системы при приемлемом коэффициенте ошибок. Используемая в настоящее время в Лаборатории высоких энергий цифровая линия

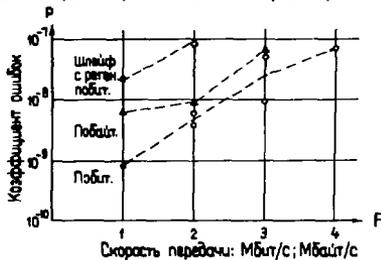


Рис. 5. Коэффициент ошибок и скорость передачи.

связи - система передачи с одним промежуточным пунктом регенерации, расположенным в измерительном центре синхрофазотрона на расстоянии 850 м от ЭВМ ЕС-1040. Этот пункт связан с физическими установками абонентскими линиями /от нескольких десятков до одной - полутора сотен метров/. Осуществляемая регенерация частичная - только по амплитуде.

Производится коррекция только импульсов синхронизации.

Из рис.5 приводятся графики зависимости коэффициента ошибок от скорости передачи для данной цифровой линии связи. Графики построены на основании результатов предварительных измерений для побитной и побайтной передачи в схеме испытаний по направлению и побитной - с регенерацией по схеме испытаний шлейфом. Из графика /средняя кривая/ видно, что существующая система передачи данных удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям. Нижняя кривая характеризует работу на линии отдельных ячеек /разрядов/ передатчика и приемника, которые были затем использованы для построения соответствующих блоков с байтным форматом. Две точки верхней кривой относятся к линии двойной длины / $2 \times 850 = 1700$  м/.

Во всех этих случаях по кабелю связи передавались 14 сигналов /разрядов/. При побитной передаче контролировался только один разряд, остальные линии имитировали работу других разрядов. При побайтной передаче контролировались 8 разрядов, остальные имитировали помехи. Естественно, что при той же вероятности искажений отдельных разрядов в байтной системе будет зарегистрировано больше ошибок.

Частота ошибок в случае с промежуточной, но неполной регенерацией, возрастает значительно сильнее, чем вдвое / $9.12$ /. Однако при сравнительно коротких абонентских линиях не ожидается заметного увеличения ошибок по сравнению со значениями, представляемыми средней кривой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брусиловский К.А. Измерения искажений импульсов в системах передачи дискретной информации. "Наука", М.-Л., 1965.
2. Joosten J.M. High Speed Data Transmission System for CERN Data Lines. Int. Symp. on Nucl. Electr., France, 1968.
3. Статистика ошибок при передаче цифровой информации. Пер. с англ. под ред. С.И.Самойленко. "Мир", М., 1966.
4. Мешков А.А. и др. Измерение телефонных каналов, предназначенных для передачи данных. "Связь", М., 1967.
5. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. Госиздат. техн.-теорет. лит-ры. М., 1957.
6. Bennett W.R., Davey J.R. Data Transmission McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1965.
7. Системы передачи сообщений. Пер. с англ., "Связь", М., 1976.
8. Маевский В. и др. Цифровые системы передачи. "Связь", М., 1979.
9. Соучек Б. Мини-ЭВМ в системах обработки информации. "Мир", М., 1976.

10. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. "Наука", М., 1965.
11. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. "Сов. Радио", М., 1962.
12. Designing with TTL Integrated Circuits. Ed. by L.M.Morris, J.R.Miller. McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1972.
13. Диксон Р.К. Широкополосные системы. "Связь", М., 1979.
14. Holford R.M. Presudo-Random Pulses for Calibration of Nuclear Instruments. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1969, vol. NS-16, No.1.
15. Фрид Э. и др. Малая математическая энциклопедия. Изд-во АН ВНР, Будапешт, 1976.
16. Энциклопедия элементарной математики. Кн.1, под ред. П.С.Александрова и др. Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, М.-Л., 1951.
17. Корн Г.А. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. "Мир", М., 1968.
18. Кривошеев М.И. и др. Цифровое телевидение. "Связь", М., 1980.
19. Electronic Instruments and Systems. Hewlett-Packard Catalog, USA, 1977.
20. Electronic Instruments and Systems. Hewlett-Packard Catalog, USA, 1978.
21. Electronic Instruments and Systems. Hewlett-Packard Catalog, USA, 1979.
22. Electronic Instruments and Systems. Hewlett-Packard Catalog, USA, 1980.
23. HP-1B. General Information, USA, 1976.
24. Радиоизмерительные приборы. Каталог-проспект ЦООНТИ "ЭКОС", М., 1976.
25. Као Дак Хьен, Крячко А.П. Система для измерений частоты ошибок и наладки цифровых линий связи в стандарте КАМАК. Международный симпозиум по ядерной электронике, Дрезден, ГДР, 10-16 апреля 1980 г. Тезисы докладов, с.115.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 июля 1980 года.