

**Б. С. СИНИЦЫН**  
(Новосибирск)

## **СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

В работе уточняются понятия корреляционных измерений и корреляционных измерительных систем; приводятся краткие сведения о трех основных методах определения корреляционных функций. Рассматриваются вопросы структуры корреляционных систем, в частности многоканальных и с параллельным выполнением вычислений значений каждой точки корреляционной функции. Кратко освещается состояние и задачи теории погрешностей корреляционных систем, а также некоторые перспективные вопросы их применения.

По мере расширения наших знаний, развития методов познания природы понятие «измерение» [1—3] наполняется все более новым содержанием. Особенно остро вопросы терминологии обсуждаются в последние годы в связи с началом нового этапа в развитии измерительной техники, обусловленного созданием измерительных информационных систем [4]. В области статистических и, в частности, корреляционных методов измерений большой удельный вес математической обработки данных и раздельное выполнение первичных измерений и обработки обуславливали своеобразное преобладание «вычислительной» терминологии. Статистические характеристики чаще «вычислялись», но гораздо реже «измерялись». Лишь постепенно мы снова приходили к установлению единства первичных, простейших измерений и обработки их данных. Это проявлялось прежде всего в создании статистических измерительных информационных систем. Отражения этого процесса появились и в терминологии. В настоящее время мы уже чаще говорим о статистических измерениях случайных процессов и полей, понимая под ними единый познавательный процесс, включающий и сравнение путем физического эксперимента и автоматическую обработку данных [5]. В данной статье мы ограничимся вопросами корреляционных измерений и последние будем понимать как познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента некоторого множества случайных процессов или полей  $\{X_i(t)\}$  с другим множеством  $\{U_j(t)\}$ , условно принятым за образцовое, и позволяющий установить их соответствие в пределах оценок автокорреляционных и взаимных корреляционных функций. В частном случае, когда исследуется один процесс, измерение сводится к нахождению автокорреляционной функции.

Сочетание в едином методе измерений всех этапов нахождения статистических характеристик исследуемых явлений не означает, конечно, уменьшения роли математической обработки. Более того, мы

придерживаемся такого мнения, что в настоящее время наиболее существенные особенности методов измерений определяются именно видом этой обработки, а не типами датчиков и первичных приборов. Мы попытаемся в данной работе кратко осветить состояние корреляционных методов измерений и перспективы их развития и применения.

В [6—9] приведены, хотя и не полные, но достаточно обширные списки литературных источников, включая некоторые публикации 1961—1962 гг. В библиографии к этой статье мы ограничимся в основном далеко не полными ссылками на литературу, изданную в 1961—1964 гг.

## 1. Корреляционные функции случайных процессов

Мы будем касаться в основном вопросов измерений случайных функций одной независимой переменной — времени  $t$ , т. е. случайных процессов. Для стационарных эргодических случайных процессов  $X(t)$  имеется три основных пути для нахождения корреляционных функций:

### 1. Усреднение по реализациям

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - m_x] [x(t + \tau) - m_x] \times \\ \times W[x(t), x(t + \tau)] dx(t) dx(t + \tau), \quad (1)$$

где  $R_x(\tau)$  — автокорреляционная функция;  
 $m_x$  — математическое ожидание случайной функции  $X(t)$ ;  
 $W[x(t), x(t + \tau)]$  — плотность вероятности;  
 $\tau$  — временной «сдвиг», аргумент корреляционной функции.

### 2. Усреднение по времени

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T [X(t) - m_x] [X(t + \tau) - m_x] dt, \quad (2)$$

где  $T$  — время интегрирования.

### 3. Преобразование Фурье от спектральной плотности

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (3)$$

где  $S(\omega)$  — спектральная плотность.

Первый метод связан с необходимостью выполнять параллельно во времени многочисленные измерения реализаций случайного процесса  $X(t)$ . Практически этот способ измерения корреляционных функций из-за своей сложности почти никогда не применяется. Третий метод при измерениях, т. е. при экспериментальном определении корреляционных функций, также почти не используется, ибо легче найти  $S(\omega)$  по измеренной  $R(\tau)$ , чем наоборот [10]. Таким образом, основой методов измерений корреляционных функций почти всегда являются многочисленные варианты выражения (2). Последнее приведено нами для автокорреляционной функции, но может быть, конечно, распространено и на случай взаимной корреляционной функции.

## 2. Структурные особенности корреляционных измерительных систем

Под автоматическими корреляторами часто подразумевают только вычислительные устройства для обработки данных, хотя существуют многочисленные примеры объединения всей аппаратуры, служащей для измерений корреляционных функций, в единые системы. Имея в виду эти общие случаи, мы будем понимать автоматические корреляторы как измерительные системы, включающие все необходимые для выполнения исследования элементы. Те же случаи, когда коррелятор состоит только из вычислительного устройства для обработки данных, будем считать частными. Вариант классификации корреляторов приведен в [9], здесь же мы рассмотрим несколько подробнее лишь подразделение корреляторов на группы в зависимости от их структуры и методов обработки данных.

Простейший по своей схеме коррелятор имеет вычислительное устройство, пригодное для одновременного нахождения одной единственной точки корреляционной функции (рис. 1). Исследуемые случайные процессы  $X(t)$  и  $Y(t)$  после преобразований входными блоками  $B_x$  и  $B_y$  и задержки процесса  $Y(t)$  элементом  $\tau$  поступают в устройство умножения (произведения)  $\Pi$ . Интегрирование осуществляется блоком Ин. Полный (в рамках корреляционной теории) результат измерения определяется корреляционной матрицей

$$\| R_{xy}(\tau) \| = \left\| \begin{array}{cc} R_x(\tau), & R_{xy}(\tau) \\ R_{yx}(\tau), & R_y(\tau) \end{array} \right\|, \quad (4)$$

т. е. требует нахождения авто- и взаимных корреляционных функций. В рассматриваемой простейшей структурной схеме отсутствуют устройства для регистрации исследуемых процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$ , поэтому каждая точка любой из определяемых корреляционных функций находится по новым участкам реализаций процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$ . Требования к их стационарности должны быть весьма жесткими.

Более совершенны системы, имеющие устройства для регистрации и последующего многократного считывания первичных данных  $X(t)$  и  $Y(t)$  (рис. 2). Запись процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  на носителях информации  $НИ_x$  и  $НИ_y$  осуществляется при помощи регистрирующих органов  $РО_x$  и  $РО_y$ . Считывающие органы  $СО_x$  и  $СО_y$ , являющиеся элементами считывающих блоков  $C_x$  и  $C_y$ , одновременно позволяют получить необходимые задержки  $\tau$ . Все точки корреляционной функции будут определены одним и тем же участком реализаций. Однако принцип последовательного во времени нахождения точек корреляционной функции сохраняется и в этой схеме.

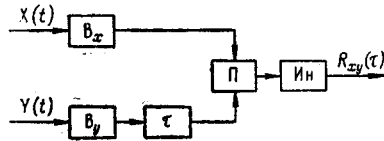


Рис. 1.

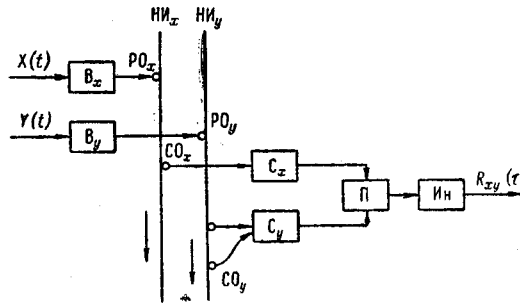


Рис. 2.

В последнее время все чаще бывает необходимо обрабатывать данные непосредственно в процессе эксперимента. Вычислительное устройство измерительной корреляционной системы должно для этого обладать большой скоростью работы. Приходится отказываться от простейших одноканальных схем и переходить к многоканальным схемам, обеспечивающим одновременное измерение нескольких или даже всех необходимых точек корреляционной функции [11, 12]. Соответствующие структурные схемы приведены на рис. 3, а и б. Итак, первый метод увеличения скорости измерения сводится к параллельному во времени определению многих значений корреляционной функции. Однако все

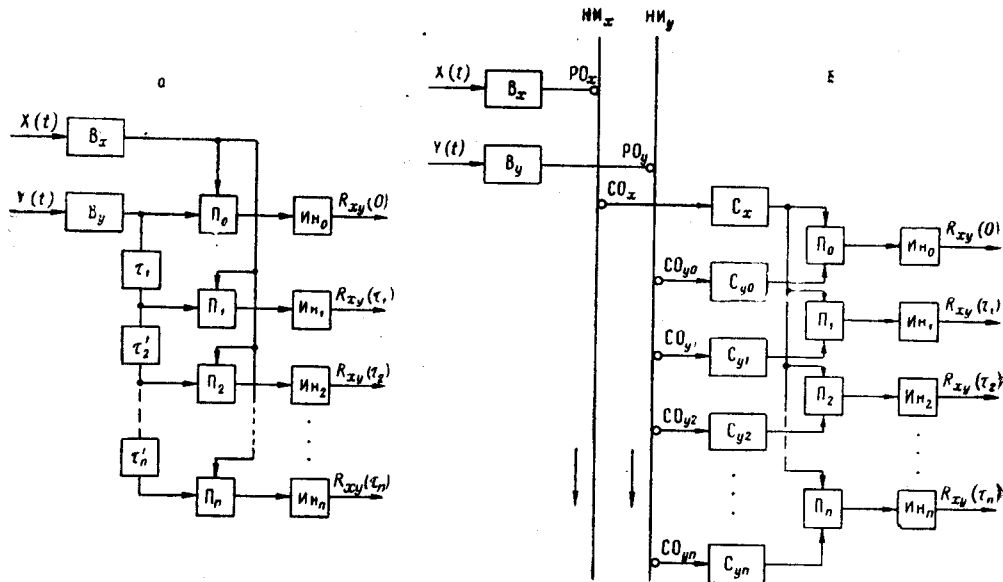


Рис. 3.

вычисления, необходимые для измерения каждой отдельно рассматриваемой точки корреляционной функции, осуществляются последовательно во времени. Возможен и второй, принципиально отличный от первого, метод увеличения быстродействия корреляционных систем. Он заключается в одновременном определении всего множества произведений  $X(t_i) Y(t_i + \tau)$ , где  $-T < t_i < T$  при некотором постоянном  $\tau$ ,

и в одновременном их суммировании  $\sum_{i=1}^n X(t_i) Y(t_i + \tau)$ . Естественно,

что подобное параллельное выполнение всех вычислений, связанных с определением одной точки корреляционной функции, возможно только при наличии регистрации первичных данных. Первым, известным нам коррелятором, относящимся к этому типу, является прибор, рассмотренный в [13], краткое описание второго приведено в статье [14]. Характерной особенностью рассматриваемого метода увеличения быстродействия является наличие какого-либо специального способа регистрации данных, позволяющего использовать носители информации  $НИ_x$  и  $НИ_y$  не только для регистрации и получения задержки во времени, но и для выполнения умножения и интегрирования. Так, например, в приборе, описанном в [13], применена фоторегистрация процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  по

методу интенсивности. Наложение двух фотопленок и измерение проходящего через них светового потока при помощи фотоэлемента позволяют практически мгновенно находить каждое значение  $R(\tau)$ . Структурная схема подобных корреляторов имеет совмещенный блок произведения и интегрирования (рис. 4). Возможны и иные варианты реализаций корреляторов с параллельным вычислением значений каждой точки, в частности мыслима цифровая система, в которой все произведения  $X(t_i)Y(t_i + \tau)$  находятся параллельно во времени. В принципе нет препятствий для совместного использования обоих методов увеличения быстродействия корреляционных систем, однако пока еще такой совмещенный метод не практикуется.

Большое влияние на структуру корреляционных систем оказывает выполнение их по аналоговому, дискретному или комбинированному принципу. До недавнего времени подавляющее большинство корреляционных систем были аналоговыми, хотя и встречались отдельные удачные разработки цифровых корреляторов. Это в какой-то степени можно было считать оправданным, ибо большой точности при корреляционных измерениях не требовалось, аналоговые системы были проще и дешевле, чем цифровые. Исключением являлись лишь полярные дискретные корреляторы, основанные на определении вероятностей совпадения или несовпадения знаков исследуемых процессов. Благодаря исключительной простоте они уже давно нашли себе широкое применение. Однако в последние годы, с одной стороны, повысились требования к точности корреляционных измерений, а с другой — совершенствование дискретной техники позволило создавать цифровые корреляционные системы, сравнимые по своей сложности с аналоговыми. В довершение были выполнены работы по теории погрешности корреляторов, которые показали, что довольно высокая точность измерения может быть обеспечена при сравнительно грубом квантовании исследуемых процессов [15—19]. Эти обстоятельства усилили внимание к цифровым корреляционным системам [20—22]. Кроме того, были созданы комбинированные системы. Один из исследуемых процессов, а именно  $X(t)$ , который не подвергается задержке в звене  $\tau$ , сохраняется в аналоговой форме, а второй —  $Y(t)$ , претерпевающий задержку, квантуется [17, 23]. В случае так называемого релейного коррелятора [23] это квантование осуществляется всего лишь по двум уровням. Была также предложена модификация полярных корреляторов, распространившая область использования этих приборов на процессы с законами распределения, отличными от нормального [24]. В итоге сейчас существуют многочисленные разновидности корреляционных систем, начиная с аналоговых и кончая полярными, отличающихся друг от друга по степени квантования одного или обоих исследуемых процессов [25]. Достаточно полный сравнительный анализ различных корреляционных систем, отличающихся друг от друга по степени квантования, пока еще не выполнен. Наиболее содержательными являются работы [17] и [25], однако в них рассматриваются в основном только погрешности систем, а вопросам структуры уделено недостаточное внимание. Не исследованы еще и общие вопросы построения многоканальных систем и систем с параллельным выполнением вычислений каждого значения корреляционной функции; имеются лишь отдельные частные работы в этой области.

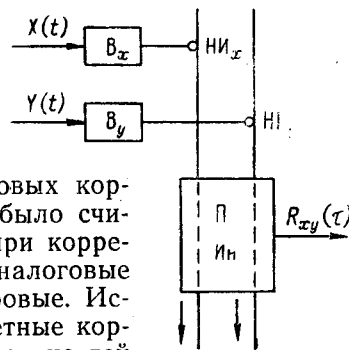


Рис. 4.

Структурные особенности корреляционных систем зачастую определяются каким-либо одним важным звеном, например элементом задержки  $\tau$ . Мы ограничимся ссылками на интересные работы, в которых рассмотрены системы с необычным способом реализации звена задержки [26, 27].

Приведем некоторые соображения относительно особенностей структуры корреляционных систем, определяемых способом сравнения с образцовыми мерами. Все рассмотренные до сих пор системы можно отнести к классу систем с «градуировкой» [28]. Действительно, они не требуют для выполнения измерений уравнивания. Существуют и

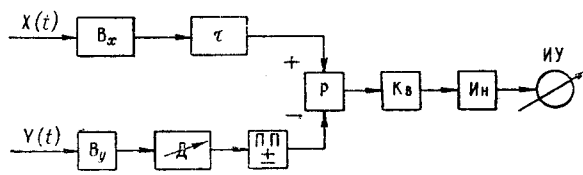


Рис. 5.

иные корреляторы — компенсационного типа, требующие для своей работы уравнивания [29]. Простейшая структурная схема компенсационного коррелятора приведена на рис. 5. Один из коррелированных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  претерпе-

вает задержку, а значение второго изменяется при помощи делителя  $D$  в необходимое число раз; имеется также звено перемены полярности ПП. Задержанный процесс  $X(t - \tau)$  можно представить как линейную комбинацию из двух членов, первый из которых —  $\alpha Y(t)$  — полностью коррелирован со вторым процессом  $Y(t)$  и поэтому может быть скомпенсирован соответствующим подбором полярности и коэффициента  $\alpha$  делителя  $D$ , а второй —  $\beta Z(t)$  — не коррелирован с процессом  $Y(t)$  и не компенсируется при любом значении коэффициента  $\alpha$ . Поскольку коррелятор представляет собой не обычный, а «статистический» компенсатор, то его «нулевой указатель», помимо звена образования разности  $P$  и индикатора — указателя равновесия ИУ, содержит также квадрататор  $Kв$  и интегратор  $Ин$ . Эти два звена необходимы для того, чтобы оценивать «равновесие» по среднеквадратическому отклонению. Основное достоинство компенсационного коррелятора заключается в принципиальной возможности получения большой точности измерения. Действительно, точность компенсации определяется погрешностями входных звеньев, звена задержки  $\tau$  делителя  $D$  и чувствительностью «нулевого индикатора» (звенья  $P$ ,  $Kв$ ,  $Ин$ , ИУ). От погрешностей же нулевого индикатора точность работы системы в первом приближении не зависит. К сожалению, компенсационный коррелятор обладает и существенными недостатками. Во-первых, в том виде, в каком он рассмотрен в работе [29], он пригоден только для измерений нормированных значений корреляционных функций. Во-вторых, минимальное показание индикатора ИУ не равно нулю, а минимум имеет расплывчатый характер, что сильно снижает точность уравнивания. И, наконец, процесс уравнивания требует времени. Несмотря на эти недостатки, значение принципиальной возможности увеличения точности очень велико. Даже этот единственный пример компенсационного коррелятора достаточен для того, чтобы говорить о возникновении нового класса корреляционных систем. Будущее покажет, насколько жизнеспособными окажутся подобные системы, сохранятся ли они в простейшем виде, предложенном в [29], или послужат основой для создания сложных систем, быть может, даже и многоканальных. В настоящее время число предложенных компенсационных корреляторов или систем, близких к ним по своему принципу, невелико [30, 31].

В заключение подчеркнем, что современные корреляторы все чаще выполняются в виде достаточно сложных и в пределах задач статистической динамики универсальных измерительных систем [22, 32, 33].

### **3. Некоторые задачи теории погрешностей корреляционных систем**

Анализ погрешностей корреляционных систем уже давно уделяется большое внимание. В настоящее время тщательно проанализированы погрешности, обуславливаемые конечностью времени интегрирования [34, 35]. Внимание к этим вопросам вполне понятно, так как, во-первых, все реальные эксперименты проводятся за конечный отрезок времени, а, во-вторых, выбор минимально допустимого времени интегрирования определяет и время проведения эксперимента в целом. Большое значение имеют также погрешности квантования, возникающие при использовании дискретных систем [15—19, 24, 25, 36—39]. Большинство исследований погрешностей, вызываемых непостоянством параметров корреляторов, особенностями их структурных схем чаще всего носит узкий характер и связано с тем или иным новым типом прибора [9, 40, 41]. Для исследования корреляционных систем представляют интерес и общие работы по теории погрешностей [42—44]. И, наконец, многие серьезные исследования посвящены рассмотрению влияния статистических характеристик изучаемых сигналов и внешних помех на точность определения корреляционных функций [45—49].

Требования, которые формулируются на основании исследований различных видов погрешностей, не всегда совпадают, а порой оказываются противоречивыми; тем более, что они плохо согласуются с задачами построения, возможно, более простых в структурном отношении систем. Эти обстоятельства делают весьма актуальной задачу общего анализа погрешностей корреляционных систем или хотя бы систематизацию уже выполненных исследований.

### **4. Применение корреляционных измерительных систем**

В одной статье невозможно, конечно, сколько-нибудь подробно описать многочисленные применения корреляционных систем, поэтому мы ограничимся лишь ссылками на некоторые монографии [7—9] и отметим наиболее характерные тенденции, наметившиеся в последнее время. Число работ, посвященных описанию использования корреляторов, растет быстрее, чем количество новых разработок самих систем. Корреляционные методы измерений начинают использоваться во многих сравнительно новых для них отраслях знания и техники (измерения скоростей и вибраций, геофизика, самонастраивающиеся, самообучающиеся, самоорганизующиеся системы, задачи опознания образа и т. д.). Применение их в таких областях, как исследования по распространению колебаний, прием и выделение сигналов, автоматическое регулирование и управление, радиоастрономия, акустика, биология и медицина, техническая диагностика, метеорология, еще больше расширилось. Наиболее интересные примеры использования корреляционных систем приведены в [50—53]; некоторые из них относятся к исследованию корреляционных методов при построении самонастраивающихся фильтров. Вообще применение корреляционных методов для построения самообучающихся и самоорганизующихся систем представляет, по

нашему мнению, весьма большой интерес. Так, например, корреляционные методы могут, по-видимому, найти применение и при исследованиях весьма универсального класса адаптирующихся систем — перцептронов [54—56]. Рассмотрением этого дискуссионного вопроса мы и закончим статью.

Следуя Розенблатту, будем понимать под перцептроном «... сеть чувствительных ассоциирующих и реагирующих элементов, образующих переменную передаточную матрицу  $a_{ij}$ , которая зависит от последовательности предыдущих состояний активности данной сети» [57]. Подавляющее большинство технических реализаций перцептронов предназначено для опознавания геометрических образов, однако уже

сейчас ясно, что значение и возможности их применения гораздо шире.

Попытаемся проанализировать возможности использования перцептронов для решения таких задач, как медицинская диагностика (по данным кардиограмм и энцефаллограмм), техническая диагностика (по шумам машин и механизмов), распознавание звуков речи, одним словом, для исследования всех тех явлений, которые проявляются как случайные процессы. Очевидно, что решение

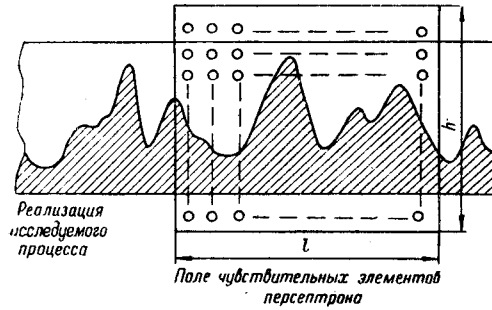


Рис. 6.

этих задач может быть сведено к опознанию геометрических образов. Но, по нашему мнению, возможен и второй метод. Опознаваемый случайный процесс постепенно, в частности в естественном масштабе времени, «вводится» в поле чувствительных  $S$ -элементов перцептрона и «пропускается» над ними (рис. 6). Протяженность  $l$  поля  $S$ -элементов должна быть достаточной для выявления характерных особенностей исследуемого процесса. Для этого, вероятно, можно использовать корреляционные зависимости. Именно корреляционные зависимости дают во многих случаях достаточное для распознавания описание процессов, они инвариантны при достаточном интервале интегрирования к началу отсчета. Протяженность  $l$  поля  $S$ -элементов должна несколько превышать интервал корреляции  $\tau_{\max}$ . Высота  $h$  поля  $S$ -элементов зависит от закона распределения по амплитуде.

Опознавание перцептронами статических геометрических образов представляет собой дискретную последовательность отдельных актов, но, насколько мы можем судить по [57], уже сейчас установлены способности перцептронов работать в динамических режимах. Предлагаемый метод целиком основывается на допущении возможности динамических режимов опознавания. Каждый отдельный акт опознавания следует теперь рассматривать как прохождение случайного процесса через систему со многими датчиками — поле  $S$ -элементов. В случае наличия статистических данных о характере исследуемых процессов, например, об их корреляционных функциях, в организацию связей между  $S$ -элементами,  $A$ -элементами и связей с  $R$ -элементами и перекрестных связей  $A$ -элементов может быть внесена предварительная информация, учитывающая априорную вероятность появления процессов с заданными корреляционными свойствами. Подобная предварительная «корреляционная» организация, вероятно, облегчит решение задачи опознавания. Можно также допустить, что необходимая протяженность поля  $S$ -эле-



ментов лишь незначительно будет превышать интервал корреляции  $\tau_{\max}$  (конечно, с учетом масштаба записи).

Мы предполагаем, что рассматриваемый метод является одним из возможных вариантов использования перцептронов для опознавания случайных процессов. Его ожидаемые достоинства: возможность использования хорошо известных корреляционных зависимостей для первоначальной организации перцептрона, решение опознавания непосредственно в процессе поступления информации, экономное построение поля  $S$ -элементов. В области теории создание подобных статистико-динамических методов опознавания ставит новые задачи. Необходимо исследовать вопросы статистической динамики перцептронов — систем со многими входами, распределенными в пространстве, и случайными свойствами.

### Заключение

Корреляционные измерительные системы разрабатываются в самых разнообразных вариантах — от сравнительно простых устройств до сложных статистических измерительных информационных систем. Повышение требований к их точности, быстродействию, использование как составных элементов еще более сложных систем обуславливают необходимость дальнейшего совершенствования корреляторов. Несмотря на многочисленную литературу по теории корреляционных систем, в частности по анализу их погрешностей, систематизация и обобщение этих исследований пока отсутствуют.

Применение корреляционных систем все более расширяется. Выполнено много исследований по методологии корреляционных измерений, в частности по учету влияния статистических характеристик исследуемых процессов и случайных помех, однако и в этой области лишь недавно появились первые обобщающие работы [8] и ощущается потребность в дальнейшей систематизации накопленных знаний.

Особенно перспективным является использование корреляционных методов для построения самоорганизующихся, самообучающихся и саморегулирующихся систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Маликов. Основы метрологии. М., Изд-во Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949.
2. Б. С. Сеницын. К вопросу о терминологии автоматического контроля. — Докл. Львовск. политехн. ин-та, т. I, вып. 2. Львов, Изд-во Львовск. гос. ун-та, 1955.
3. М. П. Цапенко и др. Кибернетика и измерение. — Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды III конференции), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
4. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика. Вестник АН СССР, 1961, № 10.
5. F. H. Lange. Der Korrelationsdetektor in der Mess und Regeltechnik. ACTA IMEKO, II. Budapest, 1961.
6. В. В. Васманов. Вычислительные математические приборы. М., Машгиз, 1958.
7. В. В. Солодовников, П. С. Матвеев, Ю. С. Вальденберг, В. М. Бабурич. Вычислительная техника в применении для статистических исследований и расчетов систем автоматического управления. М., Машгиз, 1963.
8. Ф. Ланге. Корреляционная электроника. Л., Судпромгиз, 1963.
9. Б. С. Сеницын. Автоматические корреляторы и их применение. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.
10. Х. Джеймс, Н. Никольс, Р. Филлипс. Теория следящих систем. М., Изд-во иностр. лит., 1951.

11. А. С. Усков, Ю. М. Орлов. Принципы построения и схема многоканального коррелятора. Автоматика, 1963, № 2.
12. А. Н. Домарацкий, Б. С. Синицын. Полярные корреляторы и их применение.— Автоматический контроль и методы электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений IV конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1962.
13. В. А. Зверев, Е. Ф. Орлов. Прибор для измерения спектров и корреляционных функций низкочастотных процессов. Приборы и техника эксперимента, 1960, № 1.
14. H. J. Whitehouse. Parallel digital delayline correlator. Proc. IRE, 1963, 51, № 1.
15. B. Widrow. A study of rough amplitude quantization by means of Nyquist sampling theory. IRE Trans. on Circuit Theory, 1956, v. CT-3, № 4.
16. B. Widrow. Statistical Analysis of amplitude-quantized sampling-data systems. Application and Industry, January 1961, № 52.
17. Д. Дж. Воттс. Общая теория квантования по уровню и ее использование при определении корреляции. Перев. С. Ф. Козубовского. Автоматика, 1961, № 1.
18. А. Н. Домарацкий. О вычислении корреляционных функций нормальных случайных функций на цифровых вычислительных устройствах.— Вопросы теории измерительных систем (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 11). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
19. А. Н. Домарацкий. Некоторые вопросы точности квантования нормальных случайных функций по амплитуде при вычислении их математических ожиданий.— Вопросы теории измерительных систем (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 11). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
20. J. Kotek. Cislicový korrelátor. Slaboproudý obzor, 1961, 22, № 3.
21. P. W. Cheney. A digital correlator based on the residue number system. IRE Trans., Electron. Comput., 1961, 10, № 1.
22. А. Н. Домарацкий, Б. С. Синицын. Дискретная корреляционная измерительная информационная система.— Передовой научно-технический и производственный опыт, № 30—63—515/14. М., ГОСИНТИ, 1963.
23. J. I. Bussgang. Crosscorrelation functions of amplitude-distorted Gaussian signals. Technical Report Nr. 216, Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics, 1952, 26, № 3.
24. B. P. Veltman, H. Kwakeinaak. Theorie und Technik der Polaritätskorrelation für die dynamische Analyse niederfrequenter Signale und Systeme. Regelungstechnik, 1961, № 9.
25. K. Krepler und G. W. Werner. Korrelatoren mit Amplitudenquantisierung. Messen-steuern-regeln, 1964, 7, № 4.
26. Е. М. Сухарев, В. Т. Репина. Коррелятор на линейных фильтрах. Исследования по физике и радиотехнике.— Тр. Москв. физ.-техн. ин-та, вып. 2. М., Оборонгиз, 1958.
27. G. W. Werner. Zur Korrelationstechnik in der Regelungstechnik. Messen-steuern-regeln, 1962, 5, № 8.
28. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
29. P. Fey. Einfache Korrelationsmeßverfahren. Nachrichtentechnik, 1958, 8, № 1.
30. M. Masonson. Correlation system, International Telephone and Telegraph Corp. Пат. США, кл. 324—83, № 2906956, РЖ, Электротехника, 1960, № 23, 6.18020 П.
31. G. B. Conner, jr. Cross-correlator. General Motors Corp. Пат. США, кл. 235—181, № 3011713, РЖ, Авт. и выч. техн., 1963, 9Б60П.
32. Т. И. Барткус, И. И. Гикис, Ф. П. Лапиенис, С. К. Лукошевичюс, В. В. Мещеряков, Л. А. Телькснис. Специализированная электроная вычислительная машина для корреляционного и спектрального анализа визуальных и магнитных записей случайных процессов. Автоматика и телемеханика, 1963, 24, № 6.
33. J. Krzyz. MUSA—6—ein universeller statistischer Analysator. Messen-steuern-regeln, 1963, 6, № 7.
34. Б. Н. Кутин. О вычислении корреляционной функции стационарного случайного процесса по экспериментальным данным. Автоматика и телемеханика, 1957, 18, № 3.
35. G. Schweizer. Untersuchung der auftretenden Fehler bei der Auswertung von statistischen Signalen. Arch. elektr. Übertragung, 1962, 16, № 5.
36. А. А. Косякин. К задаче исследования линейных импульсных систем при стационарных случайных воздействиях. Автоматика и телемеханика, 1963, 24, № 3.
37. Ю. М. Коршунов. Определение ошибок, вызванных квантованием по уровню в цифровых системах автоматического регулирования. ИВУЗ, Приборостроение, 1962, 5, № 5.
38. С. Ф. Козубовский. Автоматические корреляционные измерители скорости. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
39. А. С. Немировский. Методическая ошибка дискретного интегрирования.— Тр.

- ин-тов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1962, вып. 57 (117).
40. P. R. Westlake. The effects of noise through an analog integrator which intergates with respect to an arbitrary variable. IRE Trans., Aerospace and Navig. Electron, 1962, 9, № 3.
  41. Г. А. Балл. Об одном способе ускорения аппаратурного корреляционного анализа. Автоматика и телемеханика, 1963, 24, № 9.
  42. М. Л. Быховский. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1958.
  43. В. И. Сергеев. Основы инструментальной точности электрических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
  44. А. С. Немировский. Интеграторы измерительных приборов. М., Стандартгиз, 1960.
  45. M. J. Jacobson. Output probability distribution of a correlation detector with signal-plus-noise inputs. Jour. of the As. Soc. of Am., 1963, 35, № 7.
  46. B. R. Mayo, D. K. Cheng. Analisis of correlator signal-to-noise characteristics. IRE Trans. Commun. Syst., 1962, 10, № 3.
  47. D. Middleton. Acoustic signal detection by simple correlators in the presence of non-Gaussian noise. I. Signal-to-noise ratios and canonical forms, J. Acoustic. Soc. of America, 1962, 34, № 10.
  48. H. Ekke. Polarity coincidence correlation detection of a weak noise source. IEEE Trans., Inform. Theory, 1963, 9, № 1.
  49. Н. Ф. Воллернер, Н. Г. Гаткин, М. Н. Карновский. Помехоустойчивость приемника, образующего совокупность отсчетов автокорреляционной функции. Радиотехника, 1962, 17, № 2.
  50. А. Г. Ивахненко. Корреляционные методы в кибернетических системах автоматического управления. Автоматика, 1960, № 2.
  51. L. M. Sareg. On-line auto-and cross-correlator realized with hybrid computer techniques. IEEE internat. Con. Rec., 1963, 11, № 9.
  52. A. A. Wolf, J. H. Dietz. A statistical theory for parameter identification in physical systems. J. Franklin Inst., 1962, № 5.
  53. D. Gabor, W. P. L. Wilby, R. Woodcock. Универсальное нелинейное фильтрующее упреждающее и моделирующее устройство с самонастройкой в процессе обучения. Экспресс-информация. Приборы и элементы промышленной автоматки, 1961, 47.
  54. Ф. Розенблатт. Обобщение восприятий по группам преобразований. Кибернетический сборник, 1962, № 4.
  55. В. М. Глушков. Введение в кибернетику. Киев, Изд-во АН УССР, 1964.
  56. А. Г. Ивахненко. Самообучающиеся системы с положительными обратными связями. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
  57. А. Г. Ивахненко, В. В. Клещев, Г. Л. Отхмезури, М. И. Шлезингер. Основополагающая монография по теории перцептронов (рецензия на книгу Ф. Розенблатта «Принципы нейродинамики»).— Автоматическое управление и вычислительная техника, вып. 6. М., Машиностроение, 1964.

*Поступила в редакцию  
29 сентября 1964 г.*