

Б. М. ПУШНОЙ
(Новосибирск)

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Сейчас, по крайней мере, научная и производственная деятельность человека неотделима от машин — технических устройств и систем. Прогресс в науке и производстве определяется и характеризуется появлением новых технических систем. Их можно рассматривать как часть материального мира, преобразованную и упорядоченную в соответствии с потребностями общества. Именно через посредство таких технических систем общество (и человек как его составная часть) вступает в настоящее время в контакт с природой, точнее с той ее частью, которая не вошла (или пока не вошла) в состав технических систем.

В соответствии с современными кибернетическими представлениями в любой достаточно сложной машине можно выделить некоторую часть, которая осуществляет получение и преобразование информации. Эта информация используется (как с участием, так и без участия человека) для управления материальными и энергетическими ресурсами, которыми машина или система машин располагает. Тенденция развития технических систем такова, что на них постепенно возлагаются все более усложняющиеся задачи управления: человек в конечном счете оставляет за собой лишь постановку задачи, формулировку цели. В связи с этим усложняются и задачи обработки информации в технических системах. Можно сказать, что в технических системах информационная часть, в свою очередь, состоит, по крайней мере, из трех легко различимых по своему назначению систем: измерительной системы, системы обработки информации и системы управления. В задачу измерительной системы входит получение количественных оценок состояния внешней по отношению к технической системе среды и оценок параметров самой технической системы, если они изменяются. Задача системы обработки состоит в оценке ситуации, в которой находится техническая система, с позиций, заданных человеком, и выработке решения, определяющего способ действия системы [1]. Наконец, система управления должна определить, какие изменения нужно произвести в технической системе, чтобы она наилучшим образом использовала заложенные в ней возможности, например энергетические, для реализации решения.

Такое подразделение информационных узлов технической системы является условным. В зависимости от характера общей задачи оно существенно изменяется. Если рассматривается техническая система,

предназначенная для осуществления физического эксперимента, то в ней задачи автоматического управления часто отходят на второй план, а центральное место занимает измерение и обработка данных. В задачах автоматизации производственных процессов основное внимание сосредоточивается на методах управления; при этом измерение и обработка результатов занимают подчиненное положение и как самостоятельные задачи не рассматриваются. Наконец, очень часто в центре внимания исследователя находятся задачи обработки информации с помощью ЭВМ, и тогда, как правило, понятие обработки информации включает в себя и задачу управления.

Следует заметить, что задачи обработки информации чрезвычайно разнообразны по своему целевому назначению, объему, конкретному содержанию и математическим методам, лежащим в их основе. Поэтому в последнее время наблюдается дифференциация методов обработки данных, которая идет по двум путям: разрабатываются специальные математические методы, например, эвристическое программирование, и выдвигаются специальные практические задачи, имеющие самостоятельное значение, например, сокращение избыточности результатов измерения.

Среди многочисленных специальных задач обработки данных можно выделить некоторую группу, которая имеет непосредственное отношение к процессу измерения. О том, что такие задачи существуют, свидетельствует значительное количество работ, например [2—4]. Представляет интерес каким-либо образом определить круг этих задач, найти их характерные черты. Измерительная система, даже если она представляет собой часть более общей технической системы, содержит в себе элементы вычислительной техники [5, 6]. Значительная часть современных измерительных приборов, особенно цифровых, производит наряду с измерением некоторую обработку данных, которую иногда называют первичной [7]. И поскольку отчетливо наблюдается тенденция к усложнению измерительных приборов и систем, усложнение происходит и за счет введения в приборы и системы вычислительных устройств. Таким образом, обсуждая всякий раз тенденции развития измерительных систем, приходится связывать их с вопросами обработки данных.

Конечно, далеко не во всех случаях обработка требуется, все определяется конкретными условиями. Рассмотрим простой пример. Любой автомобиль снабжен бензомером. Он представляет собой чаще всего датчик уровня, отображающий положение поплавка в электрическом сигнале. Сигнал измеряется стрелочным прибором, установленным на приборном щитке. Нетрудно видеть, что бензомер представляет собой измерительную систему — часть более сложной технической системы — автомобиля. Если бак только что заправлен, водитель не обращает внимания на показания бензомера, за исключением тех случаев, когда нужно убедиться в его исправности. Никакой обработки данных здесь не требуется. Но положение коренным образом изменяется, если стрелка бензомера «лежит на нуле», а до ближайшей заправочной станции несколько километров. Приходится интересоваться погрешностью бензомера.

Знание номинальной погрешности ничего не дает. Нужно знать систематическую погрешность прибора, и не в среднем по шкале, не абсолютное значение, а фактическую ее величину в начале шкалы. Опытный водитель обычно имеет представление о величине и знаке этой погрешности. Но этого мало для уверенного ответа на вопрос, доберется ли автомобиль «своим ходом» до заправочной станции. Приходится обращать внимание на форму днища бака, на расход топлива при различ-

ных режимах движения, на состоянии дороги. Нужно знать достаточно точно расстояние до станции и т. д. Иными словами, приходится привлекать не только результат измерения и характеристики измерительной системы, но и характеристики объекта, с которым связана измерительная система (бак, двигатель, автомобиль), и даже условия, в которых он находится (дорога и ее характер).

Но и этим обработка не исчерпывается. Автомобиль как система в целом имеет свою программу действий, соответствующую более общей задаче; он должен, как правило, двигаться по определенному маршруту и прибывать в заданные пункты в соответствии с некоторым расписанием. Нарушение такой программы обычно связано с определенными потерями. Показания бензомера после их сопоставления с другими данными по сути дела предсказывают возможность потерь, а задача дальнейшей обработки состоит в минимизации этих потерь.

Итак, даже на этом элементарном примере отчетливо просматривается связь измерительной системы с объектом, роль обработки данных и в частности — обработки, связанной непосредственно с измерительной системой. Действительно, к ней можно, безусловно, отнести анализ погрешности. Что касается анализа возможных потерь из-за задержки автомобиля, то эту задачу заведомо не стоит связывать с измерительной системой: она относится к технической системе в целом. Хотя процесс преобразования измерительной информации может простираться вплоть до оценок поведения технической системы в целом, существует граница, вне которой процесс обработки данных уже нет смысла рассматривать как обработку измерительной информации. Существование этой границы имеет не только теоретическое, но и научно-организационное значение, оно диктуется существованием принципа разделения труда между научно-техническими специалистами. Правильный выбор границы иногда оказывает решающее влияние на успешную работу специалистов по измерительной технике в комплексных задачах. Положение этой границы в общей цепи последовательных операций обработки данных зависит от содержания конкретной задачи и подхода к ее решению. Уточнить положение границы можно и с некоторой общей точки зрения, если ориентироваться на какую-либо характерную особенность, присущую обработке измерительной информации.

По-видимому, обработку информации в измерительной системе можно считать завершенной, когда измерительная информация представлена в форме математического описания объекта измерения, причем всем параметрам этого описания даны числовые значения и дополнительно даны оценки погрешностей, которые могут содержаться в этих числовых значениях. Задача измерительной системы — наполнить конкретным числовым содержанием общего вида математические соотношения, описывающие объект измерения. При этом теоретическая схема объекта, выражающая связь между его характеристиками и справедливая (разумеется, в известных пределах) по отношению к любому его состоянию, превращается в характеристику данного конкретного состояния объекта измерения в строго определенный интервал времени.

Можно привести некоторые соображения, свидетельствующие о том, что обработку информации в измерительных системах следует рассматривать в тесной связи с математическим описанием объекта измерения.

Вопрос о погрешностях практически в любой измерительной системе является центральным. В соответствии с этим к методам обработки предъявляется наряду с другими требование повышения достоверности результатов измерения, снижения вредного влияния погреш-

ностей первичных результатов измерения. Допустим, что мы имеем дело лишь со случайными нормальными аддитивными погрешностями. В этом случае оптимальным методом обработки является метод максимума правдоподобия [8], который приводит к замене совокупности n результатов измерения некоторой однородной линейной функцией m параметров, причем $n \gg m$. Отношение n/m полностью характеризует при некоррелированной погрешности измерения выигрыш в дисперсии результата, полученного путем обработки, так что всегда полезно стремиться к увеличению этого отношения. Величина n ограничена сверху сложностью и быстродействием первичных измерительных устройств, а минимальное допустимое значение m определяется тем, насколько хорошо выбранная нами однородная линейная функция описывает поведение или состояние объекта, представленное результатами измерений, т. е. близка ли она по форме к математическому описанию объекта. Идеальный случай встречается тогда, когда структура объекта измерения такова, что его математическое описание как раз является однородной линейной функцией его собственных параметров. Здесь метод максимума правдоподобия непосредственно приводит к количественно определенному математическому описанию объекта. Нелинейные относительно параметров описания заставляют искать условия, в которых допускается линеаризация. Обработка становится итерационной, усложняется ее процедура, но это в данном случае не представляется существенным. Важно в конечном счете то, что требование наиболее эффективной обработки приводит обычно к тому, что необходимо искать и использовать математическое описание объекта измерения.

При коррелированных случайных погрешностях или неравноточных первичных результатах измерения задача оптимальной обработки несколько осложняется. Если воспользоваться геометрической интерпретацией метода максимума правдоподобия [9], можно заключить, что эффективность обработки целиком определяется формой корреляционного эллипсоида и его ориентацией относительно пространства параметров. Наилучшее описание результатов обработки здесь уже не совпадает с описанием объекта измерения. Оптимальная обработка соответствует такому пространству параметров, которое, проходя через центр эллипсоида, дает минимальный объем его сечения. Объем сечения определяется направлением пространства параметров и его размерностью. Возможны два крайних случая. Пространство параметров, пересекая эллипсоид, содержит в себе его минимальные главные оси. Такое пространство в общем случае не совпадает с описанием объекта, что, в свою очередь, приводит к повышению размерности пространства параметров. Пространство параметров может иметь минимальную размерность, когда оно соответствует математическому описанию объекта, но в этом случае, оно, как правило, пересекает эллипсоид не наилучшим образом. Оптимальное пространство должно занимать некоторое промежуточное положение.

Совершенно ясно, что, не располагая математической моделью объекта измерения, невозможно найти оптимальное пространство. Важно обратить внимание и на другую деталь — роль корреляционного эллипсоида в данной задаче. Корреляционная матрица представляет собой не что иное, как математическое описание погрешностей первичных измерений, т. е. математическое описание измерительного устройства. Описания объекта измерения и измерительной системы входят в задачу обработки одновременно на равных основаниях и совместно отражают, если угодно, процесс измерения.

информации ставится задача получить ее оценку. Эта задача относится к статистическому анализу, она достаточно хорошо разработана как теоретически, так и практически [10—12]. Дополнительные осложнения возникают в тех случаях, когда погрешность нельзя считать стационарной и приходится производить корреляционный анализ погрешности непосредственно в процессе измерений, в промежутках между очередными поверками, на фоне измеряемых величин. Возможность решения такой задачи целиком зависит от наличия достаточно подробного математического описания объекта измерения, причем задача выделения и статистического анализа погрешностей одновременно включает в себя вычисление оценок параметров описания объекта.

Примерно такая же ситуация наблюдается при постановке задачи обработки результатов, направленной на ослабление аддитивных систематических погрешностей измерения. Систематические погрешности могут быть описаны некоторой функцией конечного числа параметров, в частности линейной. Все параметры обычно рассматриваются как случайные величины до тех пор, пока подробный статистический анализ не позволит установить, что некоторые из них можно считать постоянными. Если такое описание имеет достаточно хорошее физическое обоснование, оно отражает некоторый процесс, происходящий в измерительных устройствах и являющийся источником систематических погрешностей. Пусть объект измерения также описывается совокупностью параметров. Поскольку объект и измерительные устройства обычно имеют различную структуру, следует ожидать, что их описания будут иметь различную форму. Если описания линейны, их различие можно выразить через понятие линейной независимости. Для определенности будем считать, что систематическая погрешность является функцией времени и происхождение ее таково, что она полностью представляется конечным числом членов ряда Фурье

$$f_1(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos(i\omega t - \varphi_i).$$

Пусть поведение объекта измерения во времени соответствует отрезку степенного полинома

$$f_2(t) = B_0 + \sum_{i=1}^l B_i t^i.$$

Нетрудно видеть, что сумма $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$ образована линейно независимой системой функций

$$f(t) = A_0 + B_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos(i\omega t - \varphi_i) + \sum_{i=1}^l B_i t^i.$$

Параметры A_i и B_i могут быть отдельно оценены, за исключением A_0 и B_0 , которые входят в виде суммы в коэффициент при единице. Этот простой пример показывает, что различие между описанием измерительного сигнала и систематической погрешностью может оказаться неполным, частичным, а это ограничивает возможности устранения систематических погрешностей путем обработки.

Естественно, что, если объект и измерительная система не исследованы достаточно подробно, возникают серьезные затруднения. Одна из возможностей преодоления трудностей состоит в том, что в измерительную систему особым образом вводится избыточность [13]. Причем она вводится, в сущности, для того, чтобы между результатами измерений можно было найти определенного характера математические зависимости и использовать эти зависимости взамен недостающего описания измерительного сигнала и систематической погрешности. Нетрудно видеть, что и в случае систематических погрешностей наличие математической модели сигнала и погрешности играет основную роль.

Обратимся еще к одной задаче из области обработки измерительной информации — сокращению избыточности результатов измерения. Известно несколько подходов к ее решению. Один из наиболее распространенных использует принцип адаптивной дискретизации [14], который, в свою очередь, опирается на то обстоятельство, что значительной части объектов измерения, встречающихся в практических задачах, связанных, например, с контролем производственных процессов, свойственны в основном стационарные режимы работы, при которых состояние объектов не изменяется или изменяется сравнительно медленно. Относительно стабильные состояния объектов обычно чередуются с эпизодическими кратковременными переходными процессами, в течение которых почти все параметры объектов претерпевают резкие изменения. Примеры таких объектов можно легко найти среди основных технологических звеньев металлургического производства. Принцип адаптивной дискретизации сводится к подбору подходящего математического описания объекта и к оценке численных значений параметров описания хотя бы методом наименьших квадратов. Значения параметров совместно с описанием, которое выбирается обычно заранее и в процессе работы не пересматривается, начальными условиями, если их знание необходимо, и временными отметками, составляют сокращенный, «сжатый» измерительный сигнал. Такой сигнал описывает объект на протяжении интервала времени, продолжительность которого определяется полнотой описания, требуемой точностью и поведением объекта во времени. Описание объекта с найденными значениями параметров сверяется тем или иным способом с очередными результатами измерений, и, если совпадение получается неудовлетворительным, система приступает к составлению другого сжатого сигнала, соответствующего следующему интервалу времени [15].

Нетрудно видеть, что «коэффициент сжатия» можно охарактеризовать отношением среднего числа десятичных (или двоичных) знаков, которыми представляется первоначально поведение объекта на интервале дискретизации, к числу знаков, содержащихся в сжатом сигнале [16]. Этот коэффициент существенным образом зависит от вида математического описания объекта измерения. Чем точнее и компактнее описание, тем больший средний коэффициент сжатия удастся получить. Требования к математической модели в данном случае принципиально те же, что и при обработке результатов с целью ослабления случайных погрешностей. Неудивительно, что методы адаптивной дискретизации, основанные на использовании математических моделей, одновременно с уменьшением избыточности позволяют ослабить вредное влияние слабокоррелированных погрешностей, которыми сопровождаются результаты измерения [17, 18]. В задачах сокращения избыточности измерительной информации математическое описание объекта измерения также играет решающую роль. Здесь уместно привести заме-

чание, принадлежащее выдающемуся математику Гаральду Крамеру [19]: «Большое количество эмпирических данных с помощью теории можно свести в сжатом виде существенно меньшему числу характеристик, представляющих в сжатом виде существенную информацию, полученную из опыта. Так, например, сложная совокупность астрономических наблюдений, относящаяся к движению планет, в сжатом виде резюмируется системой Коперника».

При исследовании методов сокращения объема измерительных сигналов иногда может возникнуть вопрос, нельзя ли организовать измерение таким образом, чтобы параметры объекта, которые оцениваются в процессе формирования сжатого сигнала, можно было бы получить непосредственно прямыми измерениями. Такая постановка вопроса приводит к откату от процедуры сжатия и выдвигает другую задачу — рациональной организации сбора измерительной информации. По своему смыслу такая задача совпадает с задачей сжатия — здесь тоже необходимо руководствоваться математической моделью объекта измерения, — а с практической точки зрения она сводится к необходимости подбора и расстановки чувствительных элементов, которые дали бы возможность осуществить прямые измерения интересующих нас параметров [18]. Но часто эти параметры оказываются недоступными для непосредственных измерений, и не всегда можно считать рациональным разработку специализированных измерительных устройств, так что в реальных условиях задача сжатия данных и задача оптимального сбора информации взаимно дополняют одна другую.

Развитие точки зрения на задачу сжатия как на одну из форм использования математического описания объекта измерения в целях обработки данных приводит к следующей позиции. Любой объект, которому соответствует достаточно подробное математическое описание, измерительной информации (в теоретико-информационном смысле) не приводит, если он не подвержен сторонним воздействиям и в нем не возникают случайные события. Речь идет о тех внешних воздействиях и внутренних процессах, которые не описываются математической моделью. Разумеется, первоначально необходимо определить требуемой конечной точностью параметры описания, и для этого требуется получить от объекта некоторое количество информации, но в дальнейшем, поскольку состояние объекта остается неизменным, поступление полезной информации, по существу, прекращается, если не требуется последующего уточнения характеристик математического описания. Поступление дополнительной информации можно связать лишь с наличием внешних воздействий и внутренних изменений в объекте (старение, возникновение дефектов). При этом следует заметить, что объект всегда может иметь различную чувствительность к различным возмущающим факторам [20]. Представление о чувствительности можно получить из рассмотрения математической модели. Очевидно, что то наименьшее количество информации, которое можно получить путем сжатия объема измерительных сигналов, определяется существенными для объекта возмущающими факторами. Объект можно рассматривать как своего рода фильтр, по-разному реагирующий на различные воздействия. Результаты измерений — это наблюдаемая реакция объекта на возмущающие факторы. Цель обработки состоит как бы в обратном преобразовании, в установлении характера исходных возмущений. Теперь можно вернуться к вопросам, затронутым в начале обсуждения задачи обработки. Поскольку всегда определяются требования к точности, необходимо вводить подходящее описание возмущений и тем самым упрощать, усложнять модель объекта.

При этом границы объекта как бы расширяются. Эта позиция представляется удобной для рассмотрения измерительных задач, связанных с научными исследованиями.

Такая точка зрения может быть распространена и на измерительный прибор. Действительно, он представляет собой как раз то, что мы выше назвали объектом. Он обладает определенной чувствительностью к некоторому возмущению, а именно к измеряемому параметру. Он подвержен другим возмущениям, как внешним, так и внутренним, с наличием которых связано возникновение погрешности. Прибор конструируется и используется так, чтобы его чувствительность к мешающим факторам была минимальной [21]. Совершенно ясно, что описание прибора играет существенную роль. Численные значения параметров описания уточняются, когда прибор проходит периодическую поверку. В ответственных случаях описание прибора может уточняться и достраиваться непосредственно в ходе измерительного эксперимента и обработки данных.

Подводя итоги, можно сказать, что значительная часть обработки данных сводится так или иначе к одному центральному вопросу — построению количественно определенных математических моделей. Эта задача не нова. Она является предметом исследования теории идентификации объектов и систем управления, теории планирования экспериментов, математической статистики, теоретической физики. Но в ее применении к обработке информации в измерительных системах возникает много специфических особенностей. Это позволяет считать задачу построения количественно определенных математических моделей в измерительных системах самостоятельной практической задачей. Ею и определяются естественные границы обработки измерительной информации.

Остается сделать некоторые дополнительные замечания. Не следует связывать построение моделей с требованиями потребителя измерительной информации. Далеко не всегда необходимо представлять результаты измерений в виде численных значений параметров измеряемого объекта, достаточно выдать результаты первичных измерений. И в этом случае все же необходимо оперировать моделью, чтобы оценить хотя бы качественные показатели функционирования измерительной системы. Модель необходима в первую очередь для удовлетворения «собственных нужд» измерительной системы.

Хорошо известно, что успех в решении задач математической физики во многом определяется удачным выбором системы координат, в которой описывается исследуемое явление. Правильный выбор систем координат приводит к компактным математическим выражениям, параметры которых приобретают, как правило, четкий физический смысл. Выбор системы координат по своей природе объективен, он определяется накопленными ранее сведениями об объекте исследования. Но в настоящее время субъективный фактор играет в этом вопросе значительную роль. Не исключено, что задача хотя бы частичной автоматизации труда исследователя по выбору наилучшего способа описания явлений может возлагаться на измерительные системы.

Не так давно задача измерительной техники ограничивалась получением численных значений измеряемых величин. В классической работе проф. М. Ф. Маликова [22, стр. 37] указывается, что отыскание формы функциональных зависимостей выходит за пределы измерений и составляет задачу научного исследования. Но со временем определился ряд задач измерительной техники, сводящихся к измерению функций, функциональных зависимостей (спектров, корреляционных функций, переходных процессов и т. д.). С другой стороны, методы проверки статистиче-

ских гипотез позволили при обработке данных решать задачи выбора некоторой наилучшей формы функциональной зависимости хотя бы из небольшого числа вариантов. Появилась тенденция включать в задачу измерительных систем не только получение численных значений измеряемых величин, но и «измерение функций» [3, 11]. Но развитие этой тенденции необходимо разумным образом ограничить. Не нужно думать, что если в измерительной системе формируется математическое описание объекта измерения, то этим самым полностью решается задача научного исследования объекта, что в этом случае задача измерения будет включать в себя разработку научной теории, относящейся к объекту измерения. Дело в том, что математическое описание явления и его теория — это не одно и то же. Существование теории не гарантирует (или не гарантирует полностью) ее применимость на практике при организации измерений и обработки. В результате получается количественно определенное описание объекта в виде того же или несколько измененного (усложненного или упрощенного) математического соотношения, которое теперь играет роль носителя экспериментальных данных. Затем это описание предъясвляется теории. Теория должна объяснить происхождение изменений, в то время как измерительная система должна их только обнаружить и количественно оценить с приемлемой достоверностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. К. А. Лоус. Применение автоматической обработки данных в контрольно-измерительной технике и в системах управления технологическими процессами.— Труды I Международного конгресса ИФАК, т. IV. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. М. П. Цапенко, Ф. Б. Гриневич, Б. М. Пушной, А. К. Романов, Б. С. Сеницын. Измерение и кибернетика.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды III конференции, 1961 г.). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.
4. П. В. Новицкий, С. М. Мандельштам. Автоматические вычисления в измерительной технике.— Измерительная техника, 1962, № 5.
5. Н. Н. Шумиловский, М. В. Рыбашов. Применение счетно-решающих элементов в автоматических измерительных устройствах.— Вопросы электроизмерительной техники. Научные записки ЛПИ, вып. 79. Львов, 1961.
6. А. С. Немировский. Интеграторы измерительных приборов. М., Стандартгиз, 1960.
7. А. Н. Касперович. Об устранении влияния периодических помех на результаты многоточечных измерений постоянных напряжений.— Автометрия, 1965, № 2.
8. Ю. В. Линник. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1958.
9. Б. Н. Луценко, Б. М. Пушной. Геометрическая модель метода максимума правдоподобия и возможности ее использования.— I Всесоюзный симпозиум по статистическим проблемам в технической кибернетике. Тезисы докладов. М., 1967.
10. Т. Андерсон. Введение в многомерный статистический анализ. М., Физматгиз, 1963.
11. Б. С. Сеницын. Основные понятия корреляционных измерений.— В сб. «Проблемы электрометрии». Новосибирск, «Наука», 1967.
12. А. С. Немировский. Вероятностные методы в измерительной технике. М., Стандартгиз, 1964.
13. Б. М. Пушной. О систематической погрешности.— В сб. «Проблемы электрометрии». Новосибирск, «Наука», 1967.

14. З. Фридрих. К вопросу о неравномерной дискретизации непрерывных сигналов.— ИВУЗ, Радиофизика, 1960, т. III, № 2.
15. В. А. Виттих, А. Н. Гинзбург. Оптимальная дискретизация измерительных сигналов.— Автометрия, 1965, № 3.
16. В. А. Виттих. Исследование помехоустойчивости некоторых типов адаптивных дискретизаторов измерительных сигналов.— Автометрия, 1965, № 6.
17. В. А. Виттих. Оценка среднего коэффициента сжатия измерительной информации при адаптивной дискретизации по алгоритмам лежандровского типа.— Автометрия, 1966, № 5.
18. В. А. Виттих, А. Н. Гинзбург. Об одном алгоритме управления сбором информации.— Автометрия, 1965, № 2.
19. Г. Крамер. Математические методы статистики. М., Изд-во иностр. лит., 1948.
20. П. В. Кокотович, Р. С. Рутман. Чувствительность автоматических систем.— Автоматика и телемеханика, 1965, т. XXVI, № 4.
21. Н. А. Чехонадский. Использование явления компенсации погрешностей для повышения точности измерительных информационных систем.— Измерительная техника, 1963, № 1.
22. М. Ф. Маликов. Основы метрологии. М., Изд-во Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949.

*Поступила в редакцию
18 мая 1967 г.*