

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЭНЕРГИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время не существует общепринятого определения термина «преобразователь информации». Возможно его незачем вводить и обсуждать, так как в измерительной технике и системах автоматического контроля для преобразователей информации широко используются термины «датчик» [1, 2] или «преобразователь» [3]. В системах связи почти все блоки являются преобразователями информации, но этот термин не применяется, хотя анализ работы системы в целом и подробно производится с позиций теорий информации. Применение этого термина в настоящей работе вызвано стремлением найти связь между энергетическими соотношениями и информационными характеристиками для любых преобразователей информации.

Для систем связи глубоко изучено влияние энергетических параметров преобразователей на информационные, для измерительных же систем встречается мнение, что энергетические параметры преобразователей играют второстепенную роль.

Различие взглядов на преобразователи в связанных и измерительных системах является следствием обособленного развития теории этих систем. Единый подход к преобразователям информации позволит применить достижения теории и практики, полученные для систем связи, к измерительным преобразователям. В настоящее время можно видеть тройственный подход к измерительным преобразователям: во-первых, с позиций классической электроизмерительной техники, во-вторых, с позиций теории информации и, в-третьих, с позиции энергетических преобразователей. Связи измерительных и информационных характеристик посвящено много работ. Вопрос о взаимосвязи информационных и энергетических характеристик преобразователей информации освещен недостаточно и, как указывает П. В. Новицкий, [2], «есть один из наиболее интересных общих вопросов современной теории приборостроения».

Рассмотрению общей теории измерительных преобразователей, основанной на энергетических представлениях, посвящены работы Е. Г. Шрамкова [4], В. Н. Мильштейна [5], А. А. Харкевича [6] и других [7]. Эти работы представляют большой интерес, однако, в то время еще не получила распространения теория информации и, естественно, была определена взаимосвязь только измерительных и энергетических параметров преобразователей.

Из более поздних можно отметить глубокое теоретическое исследование Л. Бриллюэна [8], который показал, что любое измерение или наблюдение всегда сопровождается преобразованием энергии. При этом энтропия объекта контроля только увеличивается.

Для нас представляет интерес введенное Бриллюэном разделение информации на «мертвую» и «живую». Под «живой» понимается информация, наложенная на какой-либо энергетический носитель, способный совершать работу.

Измерение или преобразование информации в этом случае сопровождается преобразованием энергии контролируемого объекта в энергию на выходе преобразователя. Бриллюэн называет информацию «мертвой», если объект контроля не обладает энергией или преобразователь не чувствителен к энергии контролируемого объекта. Преобразование «мертвой» информации может происходить за счет энергии постороннего источника.

При этом происходит передача энергии от преобразователя к объекту контроля. Характер энергетических преобразований чрезвычайно важен при рассмотрении датчиков — преобразователей информации. Поэтому многие авторы в большей или меньшей степени касаются этого вопроса. Так, в работе [9] преобразователи «живой» информации именуется энергетическими, а преобразователи «мертвой» информации — параметрическими или модуляторными. В работе [10] эти преобразователи соответственно называются активными и пассивными. Последние наименования, на наш взгляд, являются наиболее удачными и в дальнейшем изложении будем пользоваться ими. Приведенные в работе Бриллюэна теоретические исследования имеют большой интерес, хотя для применения их к преобразователям информации требуют дальнейшей разработки. В работе В. М. Гинзбурга сделана попытка ввести критерий качества преобразователей информации как количества информации на единицу энергии. Такой критерий представляет интерес при рассмотрении измерительных устройств, но в работе [11] допущено неправильное предположение о том, что информация прямо пропорциональна энергии. В действительности, как показано в работах Н. Винера [12] и К. Шеннона [13], количество информации пропорционально логарифму изменения энергии. На эту ошибку было указано П. В. Новицким [14], который значительную часть своей работы посвятил определению связи энергии и информации. В частности, им показано, что минимальная энергия, необходимая для получения единицы информации о величине электрического напряжения в нормальных условиях, равна $3,5 \cdot 10^{-20}$ дж.

Таким образом, в указанных работах рассматривались соотношения при преобразованиях энергии, либо определялась энергетическая цена наблюдения. Взаимосвязь измерительных, информационных и энергетических характеристик преобразователей рассмотрена недостаточно.

В измерительной технике преобразователи характеризуются различными параметрами. В работе [15] приводятся четырнадцать пунктов, характеризующих преобразователь. Для нашего рассмотрения важную роль будут играть только те характеристики, которые определяют его точность, быстродействие и динамический диапазон.

В качестве информационной характеристики будем использовать пропускную способность преобразователя.

$$C = \frac{1}{\tau} \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = \frac{1}{\tau} \log (1 + D_{\text{пр}}), \quad (1)$$

где τ — время одного измерения;

P_c — мощность полезного сигнала;

$P_{\text{ш}}$ — мощность помех или шумов;

$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$ — динамический диапазон преобразователя.

В выражении (1) предполагается равномерное распределение измеряемой величины. Использование пропускной способности в качестве основной характеристики преобразователя информации в настоящее время широко применяется, но неправильное применение выражения (1) приводит к недоразумениям.

Так, в работе [16] рассматривается случай согласования производительности источника с пропускной способностью преобразователя информации. При этом условии количество информации, проходящее за единицу времени через преобразователь, одновременно определяется выражениями

$$C = n \log N \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{\tau} \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (3)$$

где n — число измерений в секунду;

$N = \frac{100}{\gamma}$ — число различных градаций измеряемой величины, равное обратной величине точности.

Определяя точность из (2) и (3), получим

$$\gamma = \frac{100}{N} = 100 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)^{-\frac{1}{\tau \cdot n}} \quad (4)$$

Из (4) следует, что точность определяется не только соотношением $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$, как принято в измерительной технике, но и произведением $\tau \cdot n$.

Таким образом, при условии $\tau n < 1$ информационные критерии дают большую точность, чем критерии, принятые в измерительной технике. Это различие в определении точности объясняется тем обстоятельством, что информационный подход учитывает согласование источника сигнала с преобразователем. Такое согласование при преобразовании электрических сигналов осуществляется за счет кодирования. Кодирование неэлектрических сигналов пока не применяется, однако выражение (4) свидетельствует о его высокой эффективности для повышения точности преобразования.

Другое неправильное толкование информационного критерия качества преобразователя возможно при учете длительности времени измерения [17]. Количество информации пропорционально времени T :

$$Q = \frac{T}{\tau} \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) = C \cdot T. \quad (5)$$

При согласовании источника сигналов с пропускной способностью преобразователя это количество информации может быть определено выражением

$$Q = \log N.$$

Отсюда

$$N = e^Q = e^{C \cdot T}, \quad (6)$$

т. е. при увеличении времени измерения точность должна расти по показательному закону. В то же время из теории измерений известно, что при статистической обработке результатов точность растет не по показательному закону, а пропорционально \sqrt{n} (n число измерений, пропорциональное T).

Кажущееся противоречие объясняется тем, что применена формула пропускной способности, справедливая только для независимых сигналов, а повышение точности в \sqrt{n} раз получено в предположении, что преобразуется неизменный сигнал, на который наложена случайная помеха. Таким образом, определения точности преобразователя методами теории информации и теории измерений не противоречат друг другу, но теория информации указывает на возможность трансформации энергетических соотношений во временные и наоборот, то есть за счет быстродействия и длительности времени возможно увеличивать точность. Наиболее объективным критерием качества преобразователей информации является пропускная способность, но для правильного использования его необходимо умение согласовывать источник сигнала с преобразователем.

Преобразование информации всегда связано с преобразованием энергии. Следовательно, согласование информационных характеристик источника и преобразователя есть одновременно и согласование их энергетических характеристик. Рассмотрим основные энергетические характеристики преобразователя, влияющие на его точность.

В соответствии с выражением (1) основной энергетической характеристикой преобразователя является отношение «сигнал—помеха» $\frac{P_c}{P_{ш}}$ на выходе его. Временные и спектральные характеристики пока не рассматриваем и принимаем спектры сигнала, помех и наводок равномерными в пределах полосы пропускания преобразователя.

При преобразовании «живой» информации источником энергии является источник информации или энергии объекта измерения $P_{ои}$. Часть этой энергии $m P_{си}$ поступает в преобразователь. Необходимо отметить, что входной сигнал является суммой энергии, несущей информацию $P_{вх\cdot сиг}$, и энергии флуктуаций источника информации $P_{вхш}$, то есть

$$\begin{aligned} P_{вх} &= P_{вх\ сиг} + P_{вхш}, \\ P_{вхш} &= P_{вх} \cdot q. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что обнаружение энергии, несущей информацию возможно при условии $P_{вх\cdot сиг} > P_{вхш}$ или условно можно принять $q = \frac{1}{2}$.

Величина коэффициента m определяется соотношением энергии объекта измерения и энергии, необходимой для работы преобразователя. Последняя расходуется на потери в преобразователе $P_{пот}$ и в выходном устройстве $P_{вых} = P_{вх} \cdot \eta$, где η — коэффициент полезного действия преобразователя.

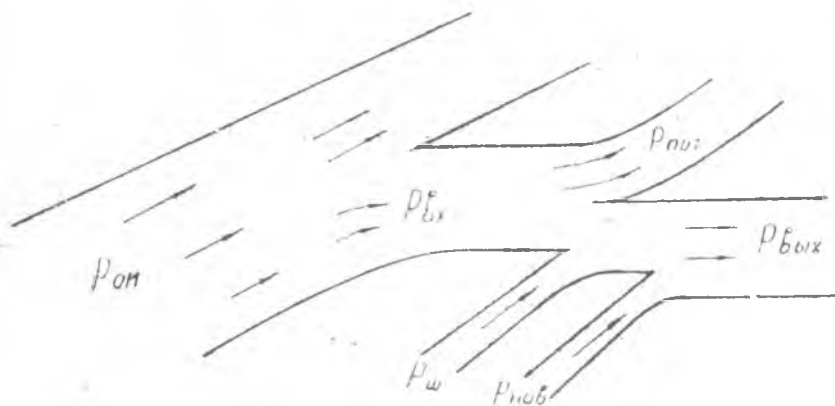


Рис. 1. Баланс энергии в активном преобразователе

В выходном сигнале кроме $P_{вых}$ имеется еще энергия шумов $P_{ш}$, возникающих в преобразователе, и энергия различных наводок $P_{нав}$. Таким образом, энергетический баланс в преобразователе можно представить в виде рис. 1.

Преобразователь в некоторой степени влияет на объект измерения. Это влияние определяется коэффициентом m . Для целей из-

мерения должно выполняться условие $m \ll \ll 1$. В случае если $m \approx 1$, измерение невозможно, возможно только обнаружить сигнал.

Порог чувствительности определяется суммарной энергией помех на выходе преобразователя:

$$P_{\Sigma \text{ пом}} = P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}} + \varepsilon P_{\text{пот}} + P_{\text{вх}} \cdot q \cdot \eta. \quad (8)$$

В выражении (8) $P_{\text{ш}}$ определяется термодинамическими флуктуациями, мощность которых зависит от полосы пропускания преобразователя и окружающей температуры; $P_{\text{нав}}$ определяется чувствительностью преобразователя к различным мешающим факторам; $\varepsilon P_{\text{пот}}$ — энергия помех, возникающих из-за потерь в преобразователе; коэффициент ε характеризуется способностью преобразователя рассеивать энергию потерь при незначительных изменениях его температуры и к. п. д.; $P_{\text{вх}} \cdot q \cdot \eta$ определяется флуктуациями входного сигнала.

Энергия сигнала, несущего информацию, на выходе преобразователя

$$P_{\text{сиг. вых}} = P_{\text{сиг. вх}} \cdot \eta = P_{\text{вх}} \cdot \eta (1 - q). \quad (9)$$

Отношение «сигнал—помеха» на выходе преобразователя, определяющее его динамический диапазон $D_{\text{пр}}$

$$D_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{сиг. вых}}}{P_{\Sigma \text{ пом}}} = \frac{P_{\text{вх}} (1 - q)}{P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}} + \varepsilon P_{\text{пот}} + P_{\text{вх}} \cdot q \cdot \eta}. \quad (10)$$

Учитывая, что $P_{\text{пот}} = P_{\text{вх}} (1 - \eta)$ и несколько преобразуя выражение (10) получим

$$D_{\text{пр}} = \frac{\eta (1 - q)}{\frac{P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}}}{P_{\text{вх}}} + \varepsilon (1 - \eta) + q \cdot \eta}. \quad (11)$$

Отношение «сигнал—помеха» на входе преобразователя, определяющее динамический диапазон объекта изменения $D_{\text{он}}$

$$D_{\text{он}} = \frac{P_{\text{сиг. вх}}}{P_{\text{пом}}} = \frac{1 - q}{q}. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что в преобразователе всегда происходит некоторая потеря информации, т. е. $D_{\text{он}} > D_{\text{пр}}$. Только у идеального преобразователя, работающего без потерь, то есть $\eta = 1$ и $R_{\text{пр}} = 0$, количество информации на входе и выходе будет одинаковым.

Анализируя выражение (11), можно наметить пути увеличения динамического диапазона или повышение точности преобразователя. Для этого необходимо конструировать преобразователь так, чтобы к. п. д. был максимален, а динамический диапазон преобразователя пропорционален к. п. д.; увеличивать мощность входного сигнала $P_{\text{вх}}$, так как при этом уменьшается влияние $P_{\text{ш}}$ и $P_{\text{нав}}$ на порог чувствительности преобразователя; увеличивать энергоемкость преобразователя, т. е. способность рассеивать энергию потерь при неизменном к. п. д.

Наглядная картина энергетических соотношений в активном преобразователе приведена на рис. 2. Здесь для простоты считаем источник информации идеальным, то есть $q=0$. К. п. д. преобразователя— почти постоянная величина до некоторого уровня входного сигнала $P_{вх}$, при дальнейшем увеличении $P_{вх}$ к. п. д. уменьшается из-за чрезмерного нагрева преобразователя.

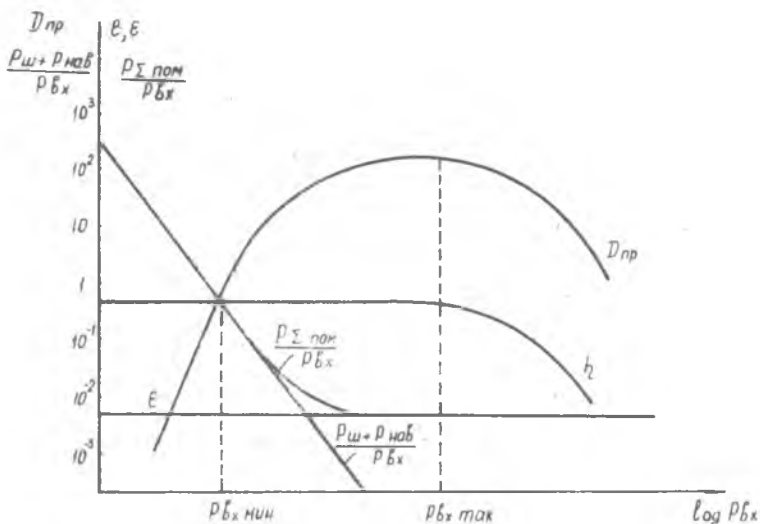


Рис. 2. Энергетические соотношения в активном преобразователе.

Абсцисса точки пересечения линии η с $\frac{P_{\Sigma пом}}{P_{вх}}$ определяет порог чувствительности преобразователя. Максимальное значение ординаты линии $D_{пр}$ соответствует оптимальному режиму работы преобразователя с информационных позиций, т. е. $P_{вх мин} < P_{вх} < P_{вх макс}$. Режим работы большинства применяемых преобразователей информации значительно отличается от оптимального $P_{вх} \ll P_{вх макс}$. В некоторых случаях это оправданно: так в системах связи коэффициент передачи $\eta = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$ входных приемных устройств практически остается постоянным во всем диапазоне реальных значений $P_{вх}$. Коэффициент $\epsilon \rightarrow 0$. Неоптимальность преобразователя в этом случае является следствием конструктивных трудностей изготовления малогабаритных преобразователей и соизмеримыми с $P_{ш}$ значениями $P_{вх}$. При использовании преобразователей информации в измерительных системах иногда возможно сделать $P_{вх}$ равным $P_{вх макс}$. За этот счет может быть увеличена пропускная способность преобразователя.

Для преобразования «мертвой» информации используются пас-

сивные преобразователи. Энергия преобразователя в этом случае определяется энергией источника $P_{и}$ и его к. п. д. η

$$P_{пр} = P_{и} \cdot \eta. \quad (13)$$

Часть энергии преобразователя взаимодействует с объектом измерения, то есть идет на «оживление» информации

$$P_{вз} = P_{пр} \cdot K. \quad (14)$$

В результате взаимодействия на выходе преобразователя появляется энергия $P_{вых1}$

$$P_{вых1} = P_{вз} (\alpha \pm q) = P_{пр} K (\alpha + q). \quad (15)$$

Здесь α — величина контролируемого параметра;

q — флуктуации величины α ;

K — коэффициент, характеризующий чувствительность преобразователя к контролируемому параметру.

Флуктуации контролируемого параметра определяются качеством носителя информации и энергией взаимодействия, то есть

$$q = q_0 + \mu P_{вз}, \quad (16)$$

где q_0 — флуктуации, обусловленные качеством носителя;

$\mu P_{вз}$ — флуктуации контролируемого параметра за счет энергии преобразователя.

Для пояснения введенных понятий рассмотрим два типа пассивных преобразователей.

Одним из простейших является реостатный преобразователь. Энергия преобразователя равна энергии подводимой от источника, то есть $\eta = 1$. «Мертвой» информацией или объектом контроля является положение движка реостата. Для «оживления» используется вся энергия преобразователя, поэтому $K = 1$. Величины α и q характеризуют положение движка и нестабильность его установки.

В индуктивном преобразователе информацией является положение подвижного сердечника. Подведенная электрическая энергия с определенным к. п. д. преобразуется в энергию магнитного поля. Часть ее взаимодействует с подвижным сердечником и после обратного преобразования в электрическую образует выходной сигнал $P_{вых1}$. В данном случае значения η и K меньше единицы и функционально связаны с положением сердечника, то есть величиной α .

Из приведенных примеров видно, что энергия взаимодействия $P_{вз}$ пассивных преобразователей эквивалентна входной энергии $P_{вх}$ активных. Увеличение $P_{вз}$ ограничивается потерями в преобразователе, за счет которых изменяется коэффициент преобразования K , и воздействием на контролируемый параметр, за счет чего увеличиваются флуктуации q .

Выходной сигнал преобразователя представляет собой сумму

$$P_{вых} = P_{вых1} (\pm P_{ш} \pm) P_{нав} (\pm \epsilon P_{пот} \quad (17)$$

В этом выражении $P_{\text{вых}}$ определяется по (15); $P_{\text{ш}}$ — энергия флюктуаций выходной величины преобразователя; $P_{\text{нав}}$ — энергия, обусловленная его чувствительностью к мешающим факторам; а $\epsilon P_{\text{пот}}$ — энергия шумов за счет потерь в преобразователе.

Необходимо учесть, что источник энергии, питающий преобразователь, содержит помехи $P_{\text{шн}}$, пропорциональные $P_{\text{н}}$, то есть

$$P_{\text{шн}} = \beta \cdot P_{\text{н}}. \quad (18)$$

Здесь β — коэффициент, определяющий шумовые качества источника питания.

Теперь можно выразить выходную энергию пассивного преобразователя через его параметры — η , ϵ , K ; параметры объекта контроля — α , q_0 , μ и параметры источника питания $P_{\text{н}}$ и β . Для этого воспользуемся выражениями (13), (14), (15), (17), (18) и получим

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}} + P_{\text{н}} \{ (1 - \beta) [\epsilon (1 - \eta) + \eta \cdot K \cdot (\alpha + q_0 + \mu \cdot P_{\text{вз}})] + \beta [\epsilon (1 - \eta) + \eta \cdot K \cdot (\alpha + q_0 + \mu \cdot P_{\text{вз}})] \}. \quad (19)$$

В измерительной технике обычно используются хорошо стабилизированные источники питания, то есть $\beta \ll (1 - \beta)$. При этом условии второй квадратной скобкой (19) можно пренебречь. Для энергоемких объектов измерения, для которых можно пренебречь влиянием $P_{\text{вз}}$ на контролируемый параметр α , полагаем $\mu \rightarrow 0$. С учетом этих предположений полезный сигнал и суммарную энергию помех на выходе преобразователя можно представить в виде

$$P_{\text{вых снг}} = P_{\text{н}} (1 - \beta) \cdot \eta \cdot K \cdot \alpha \quad (20)$$

$$P_{\Sigma \text{ш}} = P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}} + P_{\text{н}} (1 - \beta) [\epsilon (1 - \eta) + \eta \cdot K \cdot q] \quad (21)$$

Динамический диапазон пассивного преобразователя, определяемый отношением «сигнал—помеха», после незначительных преобразований будет

$$D_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{вых снг макс}}}{P_{\Sigma \text{ш}}} = \frac{(1 - \beta) \cdot \eta \cdot K \cdot \alpha_{\text{макс}}}{\frac{P_{\text{ш}} + P_{\text{нав}}}{P_{\text{нот}}} + (1 - \beta) [\epsilon (1 - \eta) + \eta \cdot K \cdot q]}. \quad (22)$$

Увеличение точности преобразователя возможно за счет уменьшения влияния энергии шумов и наводок и за счет конструктивных совершенствований. Уменьшение влияния $P_{\text{ш}}$ и $P_{\text{нав}}$ происходит при увеличении $P_{\text{вз}}$, однако при этом одновременно надо принять меры для того, чтобы q не увеличивалось. В реостатном преобразователе необходимо улучшить контакт, а в индуктивном — увеличить усилие возвратной пружины. Конструктивные совершенствования преобразователя должны быть направлены на увеличение η , K и уменьшение ϵ , q и β . Зависимость основных энергетических параметров пассивного преобразователя от $P_{\text{вз}}$ для случая идеального источника, то есть $\beta = 0$, и энергоемкого преобразователя, для которого $\epsilon \rightarrow 0$, приведена на рис. 3. Очевидно

энергия источника должна быть такова, чтобы α_{\min} соответствовала $P_{\text{вз-мин}}$, а α_{\max} — $P_{\text{вз-макс}}$. При этом динамический диапазон преобразователя максимален.

Анализ энергетических соотношений в преобразователях информации был проведен в предположении, что источник информации имеет равновероятное распределение, а спектры сигналов и помех имеют равномерное распределение в полосе пропускания преобразователя.

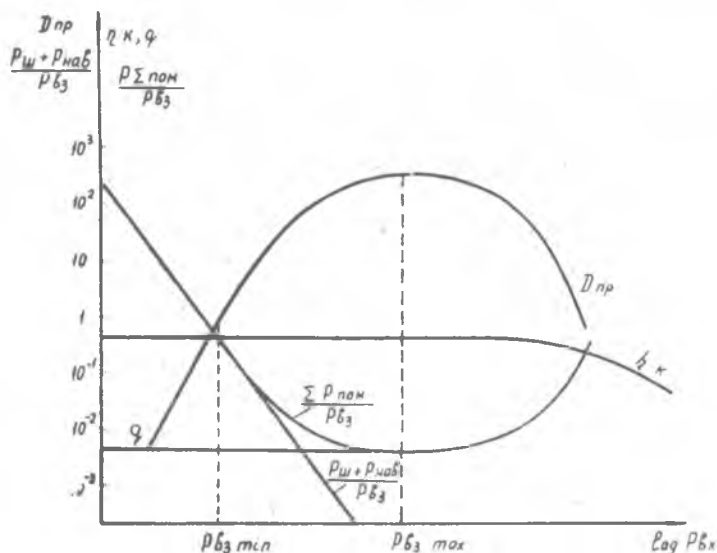


Рис. 3. Энергетические соотношения в пассивном преобразователе.

Учет реальных характеристик сигналов и помех позволит получить оптимальную пропускную способность преобразователя не только за счет оптимального энергетического режима, но и за счет оптимального использования его быстродействия, времени измерений и особенностей спектров сигналов и помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Г. Яковлев. Погрешности контрольно-измерительных приборов и датчиков, Машгиз, Киев, 1961.
2. А. М. Туричин. Электрические измерения неэлектрических величин, ГЭИ, 1966.
3. И. В. Бутусов. Автоматические контрольно-измерительные и регулирующие приборы, Гостоптехиздат, 1963.
4. Е. Г. Шрамков (ред). Электрические и магнитные измерения, ОНТИ, 1937.

5. В. П. Мильштейн. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах, ГЭИ, 1960.
6. А. А. Харкевич. Теория преобразователей, ГЭИ, 1948.
7. Л. А. Островский. Основы общей теории электроизмерительных устройств, ГЭС, 1965.
8. Л. Бриллюэн. Наука и теория информации, Физматгиз, 1960.
9. Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. Датчики систем автоматического контроля и регулирования, Машгиз, 1959.
10. Й. Форейт. Емкостные датчики неэлектрических величин, ГЭИ, 1966.
11. В. М. Гинзбург. Соотношение между информацией и энергией при измерении, Измерительная техника, № 11, 1962.
12. Н. Виннер. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине, издательство «Советское радио», 1958.
13. К. Шеннон. Математическая теория связи, в сборнике «Работы по теории информации и кибернетике», Изд-во иностранной литературы, 1963.
14. П. В. Новицкий. Некоторые вопросы информационной теории измерительных устройств. Диссертация на соискание степени доктора технических наук, ЛПИ, 1964.
15. К. Б. Карандеев (ред.) Электрические методы автоматического контроля, ГЭИ, 1965.
16. В. Мадони. Применение теории информации в телеметрии. В сборнике «Техника передачи измерений по радио с ракет и снарядов», Воениздат, 1959.
17. Резо Тарьян. Измерительная техника и теория информации. Измерительная техника, № 2, 1957.