

УДК 681.518.54:531.768

В. И. С о л е н о в

ЭЛЕКТРО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ртутно-электролитические капиллярные преобразователи, являющиеся разновидностью электрокинетических преобразователей, составляют новый, перспективный класс механоэлектрических преобразователей, пригодных для решения широкого круга задач, в первую очередь, задач виброметрии. Приведены основные виды электрокинетических преобразователей, более подробно описан принцип действия ртутно-электролитических капиллярных преобразователей, приведены его конструкция и основные технические характеристики.

В середине 70-х годов XX в. на стыке физики, химии и электроники зародилось и в настоящее время успешно развивается новое направление — хемотроника, использующая электрохимические явления для построения средств автоматизации, измерительной и вычислительной техники, моделирования биологических процессов.

Успешная исследовательская и конструкторско-технологическая работа в области хемотроники проводилась коллективами под руководством Н.С. Лидоренко, Б.С. Сотскова, П.Д. Луковцева, Р.Ш. Нигматулина, И.В. Стрижевского, А.П. Шорыгина, Б.М. Графова, М.Л. Фиша, М.С. Касимзаде, А.Н. Балашова и других ученых. Одним из перспективных классов хемотронных приборов являются электрокинетические преобразователи (ЭКП), основанные на использовании электрокинетических явлений, связанных с электромеханическими процессами на границе раздела фаз, и сопровождающихся непосредственным преобразованием энергии движения жидкости в электрическую энергию и обратно — электрической энергии в движение жидкости.

Обратимость, широкий рабочий частотный и температурный диапазоны, охватывающие частоты от тысячных долей герца до ультразвуковых и температуры $-(40 \dots 50) \dots + (150 \dots 200)^\circ\text{C}$, высокая чувствительность, большой динамический диапазон, малый уровень собственных шумов, надежность, простота конструкции — все эти качества открывают возможность широкого применения электрокинетических преобразователей в измерительной технике.

Современное развитие науки и техники предъявляет все возрастающие и разносторонние требования к элементам и устройствам автоматизации, измерительной и вычислительной техники в отношении

расширения их возможностей, улучшения конструкций и технических характеристик, а также повышения надежности. Удовлетворение этих требований невозможно без существенного развития принципов построения соответствующих элементов, привлечения для этого новейших достижений естественных и технических наук.

В настоящее время на базе ЭКП предложены и разрабатываются приборы для измерения различных механических величин: давления, перемещения, линейного и углового ускорений, тепловых, акустических, медико-биологических параметров, для перекачки, контроля состава, дозирования и измерения расхода жидкостей.

Исследования в области ЭКП проводились как в СССР, так и в ряде других стран. Однако несмотря на достигнутые результаты предстоит дальнейшее развитие теории и усовершенствование технологии изготовления этих преобразователей.

Под электрокинетическими явлениями подразумеваются имеющие общую природу явления, происходящие на границе раздела фаз и связанные с их взаимным перемещением.

Классическими формами их являются электроосмотический перенос жидкости, потенциал протекания (течения), потенциал оседания и электрофорез.

Электрокинетические явления в капиллярных системах — электроосмос, потенциал (ток) течения — можно отнести к внутренним, а электрофорез и потенциал оседания (седиментационный потенциал) — к внешним электрокинетическим явлениям.

Известны также другие явления, имеющие электрокинетическую природу или смежные с ними — звуко- электрохимические эффекты на поляризованных электродах, возникновение потенциала на проводнике с пористой изоляцией, помещенном в жидкость, движение полярных жидкостей в неоднородном электрическом поле (эффект Сумото), эффекты на границе двух несмешивающихся жидкостей, находящихся в капилляре (U -эффекты или Latur эффекты), возникновение потенциала коллоидной и ионной вибрации и т.д.

Исходным пунктом различных теорий электрокинетических явлений служит представление о наличии двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Характерной особенностью электрокинетических эффектов является их обратимость. С этой точки зрения возможно классифицировать эти явления на прямые и обратные.

Прямые явления — образование электрической разности потенциалов за счет движения жидкости относительно твердой поверхности — потенциал протекания, а также движения частиц твердого тела в жидкости — седиментационный и вибрационный потенциал.

Обратные явления — это возникновение при наличии электрического поля движения жидкости относительно твердой поверхности —

электроосмос и движения частиц твердого тела в жидкости — электрофорез.

Электроосмос и электрофорез были открыты в 1808 г. профессором Московского университета Ф. Рейссом. Развитию теории электрокинетических явлений в значительной мере способствовали фундаментальные исследования И.И. Жукова и его учеников, А.Н. Фрумкина, В.В. Дерягина, С.С. Духина и других ученых.

В настоящее время наибольшее практическое применение находят ЭКП, построенные по принципу использования потенциала протекания и электроосмоса, разрабатываются также преобразователи, базирующиеся на смежных с электрокинетическими явлениях:

- электрокапиллярные (ртутно-электролитические);
- на эффекте Сумото;
- преобразователи, использующие проводник с пористой изоляцией и др.

Учитывая обратимость указанных явлений, ЭКП следует отнести к обратимым преобразователям. Обратимость — одно из ценных свойств ЭКП.

В обоих режимах входной сигнал может быть как постоянным, так и переменным; в соответствии с этим на выходе преобразователя возникает постоянный или переменный сигнал.

Исходя из этих соображений ЭКП возможно классифицировать по режиму работы (преобразователи, работающие в генераторном режиме — генераторные, в двигательном режиме — двигательные электрокинетические или электроосмотические); по характеру входного сигнала (работающие на постоянном выходном и на переменном входном сигналах).

В дальнейшем каждый из типов преобразователей может быть охарактеризован по признакам параллельной классификации.

Генераторные ЭКП. Наиболее распространенными из генераторных ЭКП являются преобразователи с жесткими преобразующими пористыми перегородками. Другие виды ЭКП пока имеют ограниченное применение. Во всех случаях исполнения естественной входной величиной генераторных ЭКП служит градиент давления в жидкости внутри преобразующего элемента, а выходной — э.д.с, снимаемая с электродов. В генераторных ЭКП, работающих на постоянном входном сигнале, и называемых в дальнейшем ЭКП постоянного течения, рабочая жидкость непрерывно протекает через пористую перегородку в одном и том же направлении.

Генераторные же ЭКП с переменным входным сигналом содержат ограниченный, как правило, небольшой объем жидкости, заключенный в его рабочие камеры.

На рис. 1, *а* приведена схема принципиального устройства ЭКП постоянного течения, на рис. 1, *б–д* — переменного давления различных конструктивных модификаций, а на рис. 1, *е* — ртутно-электролитического капиллярного преобразователя (РЭКП).

При действии градиента давления внутри системы происходит движение жидкости в порах преобразующей перегородки, в результате чего между электродами возникает э.д.с., связанная с наличием потенциала протекания.

В конструкции (см. рис. 1, *е*) образование разности потенциалов связано с изменением строения двойного электрического слоя на границе “ртуть – электролит” при наличии механического воздействия.

Величина и полярность выходной э.д.с. зависят от величины и направления вектора скорости движения жидкости в порах перегородки.

При неизменном по величине и направлению векторе скорости на выходе ЭКП постоянного течения (см. рис. 1, *а*) генерируется постоянная э.д.с. неизменной полярности.

В случае воздействия на входе переменного давления $p(t)$ на выходе ЭКП образуется переменная э.д.с.

Конструкции ЭКП (см. рис. 1, *а* и *б*) являются основными. Первая из них может быть использована для определения расхода и контроля состава жидкостей, а также представляет собой удобную модель для экспериментального изучения свойств ЭКП. Конструкции

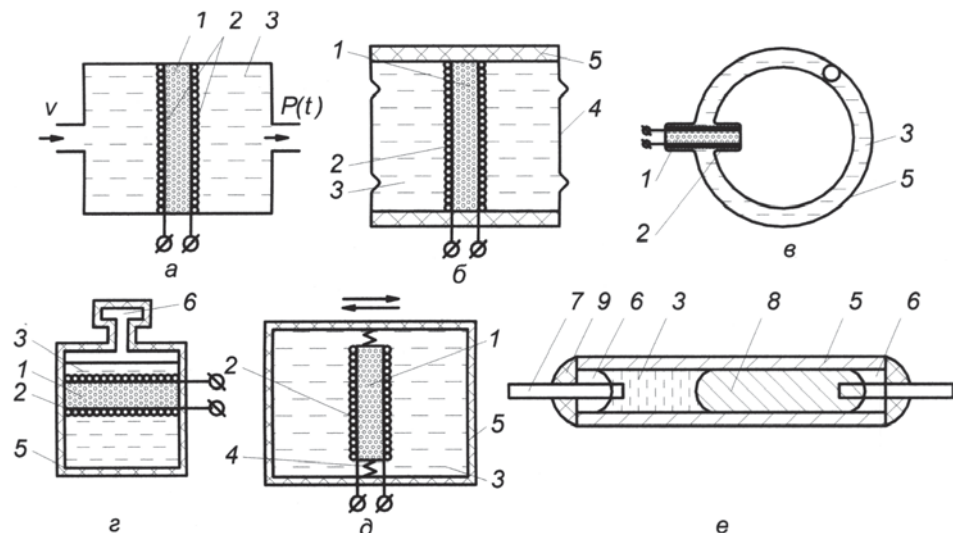


Рис. 1. Устройство ЭКП:

а — преобразователь постоянного течения; *б* — мембранный переменного давления; *в* — торoidalный; *г* — безмембранный; *д* — с подвижной преобразующей перегородкой; *е* — ртутно-электролитический капиллярный; 1 — преобразующая (пористая) перегородка; 2 — перфорированные электроды; 3 — рабочая жидкость; 4 — гибкие мембраны или гибкий элемент; 5 — корпус, из электроизоляционного материала; 6 — воздушный зазор; 7 — электроды; 8 — ртуть; 9 — эпоксидная смола

(см. рис. 1, б, д) применяются при разработке ЭКП, предназначенных для измерения переменных составляющих различных механических величин (давления, разряжения, смещения, скорости, ускорения), акустических, гидроакустических и других параметров.

Конструкция (см. рис. 1, з) выполнена безмембранной. Гибкие мембраны заменены газовым пузырьком в камере преобразователя.

На базе электрокапиллярного преобразователя (см. рис. 1, е) в 1928 г. Лятур предложил микрофон.

Первые лабораторные макеты электрокапиллярных гидрофонов, разработанные в 50-е годы японскими исследователями, по своей чувствительности оказались лучше пьезоэлектрических гидрофонов.

Благодаря своим метрологическим качествам данные преобразователи находят применение в конструкциях микрофонов, гидрофонов, а также используются как датчики параметров вибрации, датчики низких давлений при исследовании технических и биологических объектов.

Высокая чувствительность (до $1 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$), сравнительно широкий частотный диапазон (0,1...10 кГц), значительная величина выходного напряжения (до 1 В), хорошая помехоустойчивость и возможность использования без дополнительных источников энергии, а также малые габаритные размеры и масса делают ЭКП перспективными элементами автоматики и измерительной техники.

Основу генераторных ЭКП составляет электрокинетическая ячейка, состоящая из корпуса, заполненного рабочей жидкостью, и преобразующей пористой перегородки, снабженной электродами. Кроме того, в зависимости от конкретного назначения и применения, ЭКП содержит дополнительные конструктивные элементы для восприятия первичной информации, защиты от внешних влияний и др.

Электроосмотические преобразователи. Электроосмотические преобразователи (ЭОП), построенные по принципу использования электроосмотических явлений, имеют ряд достоинств, обеспечивающих им перспективность. К ним относятся: универсальность применения; эффективность работы на низких и инфранизких частотах; возможность миниатюризации и использования как на постоянном, так и переменном токах; простота устройства; отсутствие изнашивающихся механических частей; взрывобезопасность и др.

В некоторых устройствах ЭОП наиболее удачно технологически согласуются с другими электрохимическими преобразователями.

В настоящее время на базе ЭОП предложен ряд самостоятельных приборов: микронасос, вольтметр, интегратор, множительные и дифференцирующие устройства, а также элементы автоматики: реле, коммутатор, функциональный преобразователь, фильтр низких и инфранизких частот, сумматор, смеситель и др.

Могут быть построены электроосмотические фазометры, частотомеры и др. Естественно, этим не ограничивается возможность применения ЭОП. В частности, проявляется определенный интерес к электроосмотическому преобразованию электрической энергии в механическую.

Как уже указывалось, входным параметром ЭОП являются подводимые к электродам напряжение или ток через осмотическую ячейку, определяемый в первом приближении по закону Ома. Выходным параметром служит перемещение исполнительного органа, определяемое объемом жидкости, перенесенной через пористую перегородку из одной камеры в другую, или же электроосмотическое давление.

Независимо от конкретного назначения ЭОП содержит следующие основные элементы: воспринимающий орган (преобразующая пара с электродами); исполнительный орган (мембрана, капля ртути в сочетании с контактами, дополнительные капилляры, преобразующие системы и др.); промежуточные элементы, передающие и распределяющие усилия от преобразующей пары к исполнительным органам (гидропривод, клапаны и т. д.).

В зависимости от характера противодействующей силы, возникающей при работе исполнительных органов, ЭОП можно разделить на две группы.

1. Преобразователи, в которых противодействующая сила создается преимущественно упругими элементами (рис. 2, а) или квазиупругой силой гидростатического давления столбов жидкости (рис. 2, б) про-

порциональному количеству перенесенной жидкости $F_{np} = K \int_{t_1}^{t_2} q_{э.о} dt$.

В таком исполнении ЭОП может быть использован как излучатель, двигатель, вольтметр (см. рис. 2, а, б соответственно).

2. Преобразователи, в которых жидкость движется в непрерывной замкнутой гидравлической системе (см. рис. 2, в, г) и противодействующая сила создается силами вязкого трения в этой системе.

В исполнении, приведенном на рис. 2, в, ЭОП представляет собой трансформатор переменного или постоянного тока. Конструкция (см. рис. 2, г) может быть использована для разработки электроосмотического интегратора, коммутатора, функционального преобразователя и т.д.

В зависимости от рода тока, питающего ЭОП, преобразователи следует классифицировать на ЭОП постоянного и переменного тока.

Хотя по устройству электроосмотическая и генераторная электрокинетические ячейки (ЭКЯ) идентичны, однако, процессы в них следует рассматривать самостоятельно.

В отличие от ЭКЯ, выходное напряжение которой, как правило, незначительно (от долей вольта до нескольких вольт), в ЭОЯ для

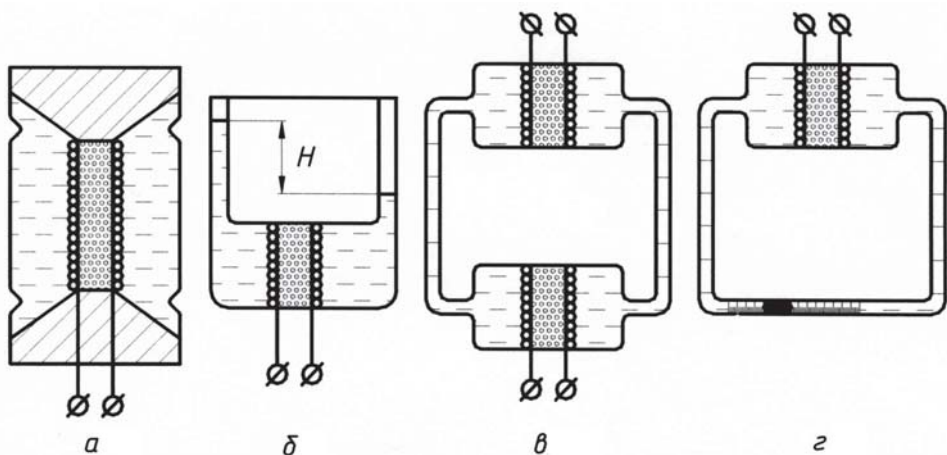


Рис. 2. Электроосмотические преобразователи:

а — мембранный; *б* — *U*-образный; *в* — электроосмотический трансформатор; *г* — замкнутым гидропроводом и ртутным указателем

получения относительно больших электроосмотических поднятий и выходных усилий (давлений) требуется приложение значительных напряжений, достигающих до сотен и тысяч вольт. Большие подводимые напряжения вызывают прохождение через ЭОЯ значительно бóльших токов, чем в ЭКЯ. Большие же токи сопровождаются интенсивными электрическими и электрохимическими процессами как на электродах, так и в жидкости ЭОЯ, приводящими к таким нежелательным последствиям, как нарушение линейности преобразования, ухудшение воспроизводимости и стабильности параметров во времени и т.д.

Только при относительно малых приложенных градиентах напряжения, не превышающих 500 В/м, обеспечивается требуемая воспроизводимость выходных параметров ЭОП.

Для нормального функционирования ЭОП его воспринимающий орган должен быть рассчитан так, чтобы активная движущая сила полностью преодолевала силы реакции исполнительных органов, достигающих иногда десятки и сотни ньютонов. Для преодоления их необходимо выбирать преобразующие пары, развивающие при прочих равных условиях большие усилия (давления). Весьма важными для расширения области применения ЭОП имеет и изыскание путей повышения их КПД.

Из описанных выше различных типов преобразователей наиболее широкое применение получил РЭКП, относящийся к генераторным ЭКП. Ртутно-электролитический капиллярный преобразователь (рис. 3) представляет собой запаянный стеклянный капилляр 1 с каплями ртути 2 и прослойками электролита 3 между ними. У герметически запаянных концов капилляра имеются пузырьки воздуха 4. В капле ртути помещены платиновые электроды, соединенные внешней цепью через измерительный прибор 5.

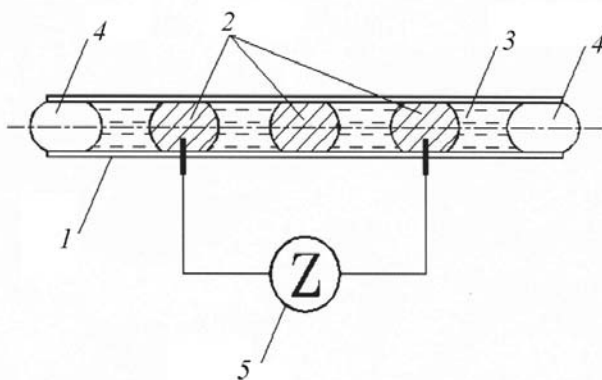


Рис. 3. К принципу работы РЭКП

Анализ термодинамических уравнений, описывающих преобразование энергии в РЭКП, показывает, что последние являются также обратимыми, причем естественной входной величиной их может быть, в принципе, любая физико-химическая величина, способная вызвать объемно-поверхностный процесс в системе и изменить строение двойного электрического слоя на границе раздела ртуть–электролит. Двойной слой в данном случае является чувствительным элементом и его с известными допущениями можно моделировать конденсатором с нелинейной емкостью, значение которой определяется поверхностной плотностью зарядов, “сортом” специфически адсорбирующихся ионов наружной электролитной обкладки, концентрацией электролита, природой растворителя и площадью поверхности раздела. При этом изменения, происходящие в преобразователе, с некоторыми допущениями могут быть охарактеризованы изменением удельной дифференциальной емкости C_d двойного слоя и описаны вторым уравнением Липпмана $C_d = -\frac{d^2\sigma}{d\psi^2}$.

При механических воздействиях, подводимых к корпусу (кинематическое воздействие) либо непосредственно к жидким объемным фазам (силовое воздействие), данный преобразователь функционирует в генераторном режиме и выходной величиной его является э.д.с., снимаемая с электродов.

Амплитудно-частотная характеристика РЭКП (рис. 4) имеет ярко выраженный резонансный характер и параметрически зависит от геометрических и гидродинамических характеристик преобразователей (радиус капилляра, число и длина прослоек раствора электролита и ртути, объемов воздушных пузырьков, плотностей и вязкости наполняющих жидкостей и др.). Варьируя конструктивными параметрами преобразователя, можно подбирать частоты, на которых будет происходить наиболее интенсивное преобразование механических колебаний в электрический сигнал.

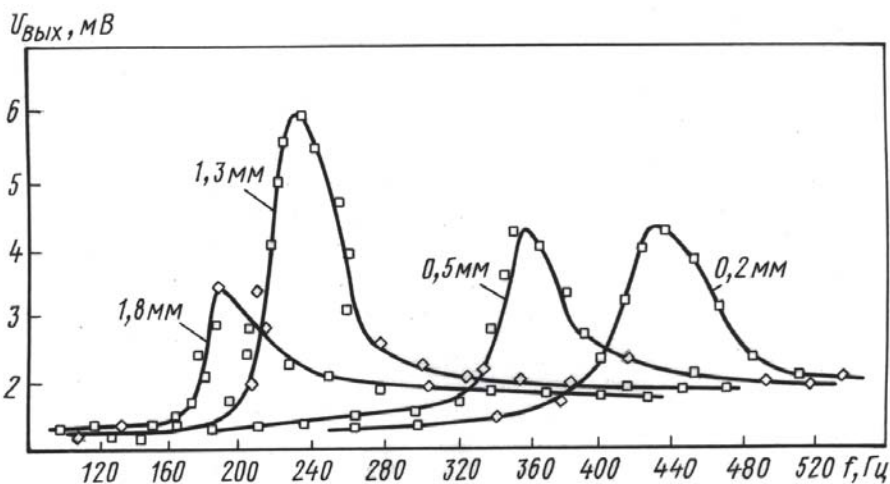


Рис. 4. Экспериментальные амплитудно-частотные характеристики РЭКП, снятые при амплитуде вибраций $\sim 3 \cdot 10^6$ и разных величинах воздушного зазора $l_{в.мин}$

Амплитудно-частотная характеристика РЭКП может быть рассчитана, если известны зависимости амплитуды изменения площади поверхности раздела δS от частоты, амплитуды колебаний преобразователя и его геометрических и гидродинамических параметров. Для нахождения изменения площади менисков необходимо исследовать возникающие в преобразователе гидродинамические течения.

Проведенные эксперименты показали, что амплитудная характеристика преобразователей имеет два рабочих участка. Первый линейный участок соответствует амплитудам входных сигналов от 10^{-7} до $5 \cdot 10^{-6}$ м в диапазоне частот от 0,5 до 13,5 кГц, а второй линейный участок соответствует амплитудам от $5 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-3} м в диапазоне частот от 0,5 до 500 Гц. Анализ амплитудных характеристик преобразователей показывает, что верхняя граница амплитуд вибрационного смещения для первого рабочего участка в области резонанса понижается.

Амплитудно-частотные характеристики наиболее характерных образцов преобразователей приведены на рис. 4. Резонансная частота зависит от конструктивных параметров ячейки и, в первую очередь, от воздушного зазора $l_{в.мин}$. Как показали проведенные исследования, для преобразователей, собственная резонансная частота которых меньше 10^2 Гц, существенное влияние на резонансные свойства при амплитудах воздействующих сигналов меньше 10^{-6} м оказывают силы поверхностного натяжения границ ртуть–электролит и ртуть–воздух. Для большинства преобразователей постоянная демпфирования около 0,12 (добротность преобразователей $Q = 50 \dots 100$), а эффективная постоянная времени около 5 с (или менее) при нагрузке 10 МОм. Коэффициент избирательности, измеренный при направлении ускоре-

ния под углом 90° к осевому, для большинства преобразователей не превышает 2 %.

Как показали измерения, внутреннее сопротивление преобразователей зависит от числа и длины столбиков электролита и концентрации раствора. Для простейших преобразователей с одной поверхностью раздела ртуть – 1 н. водный раствор NaCl внутреннее сопротивление составляет около 1...3 кОм при $l_{эл} = 10^{-2}$ м и диаметре капилляра $d = 5 \cdot 10^{-4}$ м, что хорошо совпадает с данными расчета по методу эквивалентной нагрузки.

Основные технические характеристики образцов РЭКП

Частотный диапазон, Гц	0,01... 6000
Резонансная частота (варьируется от конструктивного исполнения), Гц	30... 4500
Чувствительность на резонансной частоте, мВ/(м/с ²)	50... 500
Порог чувствительности (теоретический), м/с ²	10^{-8}
Чувствительность на частоте 30 % от резонансной, мВ/(м/с ²)	0,5... 100
Максимальная поперечная чувствительность, %	Не более 2
Внутренний импеданс:	
сопротивление, кОм	Не более 30
емкость, нФ	Не более 20
Габаритные размеры чувствительного элемента, мм:	
диаметр	3,5
длина	22... 57
Масса, г	3... 7
Габариты закорпусированного ЭКП, мм:	
диаметр	10
длина	max 70
Масса, г	25... 70
Температурный диапазон, °С	От -28 до +68

Малые габаритные размеры позволяют устанавливать датчики непосредственно в исследуемый объект. Также используются трехкомпонентные датчики (по трем ортогональным направлениям) в одном корпусе.

РЭКП сохраняют свою работоспособность и после воздействия кратковременных ударов с ускорением до 1000 м/с².

РЭКП могут быть использованы в следующих областях: измерение, анализ и регистрация механических колебаний и ударов; исследование динамических характеристик конструкций; контроль механических колебаний машин, механизмов и их узлов; измерение и регистрация колебаний земной поверхности, виброакустической эмиссии,

возникающей в горных породах при их промышленной разработке; медицине; гидроакустической локации; охране территорий и сооружений.

В настоящее время закончены или находятся в разработке приборы и системы для нужд военно-промышленного и аэрокосмического комплексов, тяжелого машиностроения, жилищно-коммунального хозяйства, горнодобывающей и пищевой промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К а с и м з а д е М. С., Х а л и л о в Р. Ф., Б а л а ш о в А. Н. Электрокинетические преобразователи информации. – М: Энергия, 1973. – 136 с.
2. Ш а ш у р и н В. Д., С о л е н о в В. И., У с а ч е в В. А., С и н а в ч и а н С. Н. Технология изготовления ртутно-электролитических капиллярных преобразователей. Под. ред. Соленова В.И. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 192 с.
3. W a t a n a b e A. A-C method Interfacial electrical phenomena // J. Electrochem. Soc. – 1963. – VHD, № 1. – P. 72–79.
4. Э л е к т р и ч е с к и е э ф ф е к т ы п р и к о л е б а н и я х к а п и л л я р о в, з а п о л н е н н ы х к а п л я м и р т у т и и р а с т в о р а э л е к т р о л и т а / А.И. Балашов, Б.В. Куксенко, Н.М. Либман и др. // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1988. – № 2. – С. 131–136.
5. С и н а в ч и а н С. Н., С и н а в ч и а н В. С. 12-ти канальный бортовой вибромметр ВМ-12 // Докл. Третьего междунар. аэрокосмического конгресса. – М., 2000. – С. 85–92.
6. С и н а в ч и а н С. Н., С о л е н о в В. И. Применение электрокапиллярных преобразователей в авиации // Докл. пятой междунар. науч.-техн. конф. АВИА-2003. – Киев, 2003. – С. 67–75.
7. С и н а в ч и а н С. Н., С о л е н о в В. И., Н и к и т и н А. П. Физические аспекты применения электрокапиллярных преобразователей // Вестник НАУ. (Киев). – 2003. – Вып. 6. – С. 61–70

Статья поступила в редакцию

Владимир Ильич Соленов родился в 1936 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии приборостроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана., лауреат Государственной премии РФ, академик МАИ, РАЕН, МАХ и МТА. Автор 229 научных работ в области радиоэлектроники и радиотехнических систем.

V.I. Solenov (b. 1936) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. D. Sc. (Eng.), professor of “Technologies of Instrumental Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Winner of the State Prize of the Russian Federation, full member of the International Academy of Information Technology, the Russian Academy for Natural Sciences, the International Academy for Cooling and the Medical and Technical Academy. Author of 229 publications in the field of radio-electronics and radio-technical systems.