

УДК 681.518.54:531.768

В. И. С о л е н о в

УЛУЧШЕНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РТУТНО- ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КАПИЛЛЯРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ртутно-электролитические капиллярные преобразователи, являющиеся разновидностью электрокинетических преобразователей, составляют перспективный класс механо-электрических преобразователей, пригодных для решения широкого круга задач, в первую очередь, задач виброметрии. Предложен новый способ повышения идентичности характеристик ртутно-электролитических капиллярных преобразователей, заключающийся в целенаправленном их формировании на этапе изготовления чувствительных элементов.

В последние десятилетия в развитых странах мира наблюдается рост интереса к различным типам первичных преобразователей информации, связанный с необходимостью улучшения их характеристик [1]. Ртутно-электролитический капиллярный преобразователь (РЭКП) является акселерометром с ярко выраженной резонансной характеристикой. Он предназначен для преобразования механических колебаний объекта, на котором он закреплен, в электрический сигнал в диапазоне частот до 4 кГц [1, 2].

РЭКП удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к современным элементам измерительной техники. К достоинствам РЭКП следует отнести такие качества, как принципиальная возможность микроминиатюризации и высокая селекция входной информации при чрезвычайной простоте конструкции [2]. В настоящее время закончены или находятся в разработке приборы и комплексы с использованием РЭКП для нужд военно-промышленного и аэро-космического комплексов, здравоохранения, тяжелого машиностроения, жилищно-коммунального хозяйства, горнодобывающей и пищевой промышленности [3–6].

Применение именно РЭКП в данных системах определяется их малыми массогабаритными параметрами, высокой чувствительностью в необходимом узком частотном диапазоне, низкой себестоимостью. Применение других типов акселерометров с линейной АЧХ в рабочем диапазоне, в первую очередь пьезодатчиков, приводит к усложнению усилительного тракта и установке дополнительных блоков фильтров для решения поставленных задач.

Приборы, системы и комплексы, где РЭКП используются в качестве первичного источника информации, можно разделить на три типа — одно-, двух- и многоканальные. Как правило, двухканальные и многоканальные системы предназначены для определения не только наличия какого-либо объекта в контролируемом объеме, площади или интервале, но и для определения его местоположения. При этом используется корреляционный анализ, определяющий необходимость идентичности характеристик блоков, входящих в состав измерительного преобразующего тракта.

Основным источником погрешности определения является преобразователь вибрации (акселерометр). В зависимости от применения требуемая идентичность таких характеристик РЭКП, как разброс, на резонансной частоте не превышает 3 %, а ее температурная зависимость не более 7 %.

Одной из технологических трудностей является сложность изготовления РЭКП с точно заданными параметрами и изготовление партий преобразователей с идентичными частотными характеристиками. По этой причине разработчиками предложены десятки конструкций РЭКП с изменяемыми в необходимом направлении характеристиками во время их эксплуатации.

Большой интерес представляет применение обратных электро-механических связей (ЭМОС) с использованием свойства обратимости механоэлектрического преобразования энергии в РЭКП. Введение ЭМОС позволяет управлять практически всеми параметрами ртутно-электролитического капиллярного преобразователя (чувствительностью, амплитудно- и фазочастотными характеристиками). Конструкция РЭКП при этом сильно усложняется, что, естественно, увеличивает технологическую сложность. Эти способы основаны на изменении массогабаритных параметров компонентов, входящих в состав РЭКП, управлении жесткостью системы, электромагнитными полями и т.д.

Преобразователь механических колебаний с изменяющимися в желаемом направлении в процессе эксплуатации частотными характеристиками (рис. 1) позволяет получать преобразователи с идентичными свойствами после изготовления обычными технологическими приемами, а также изменять их метрологические свойства без конструктивных переделок и переналадок в процессе работы [3]. Для обеспечения указанных перестроек к обычной капиллярной ртутно-электролитической ячейке добавляется дополнительная электрохимическая система, управляемая током, при помощи которой можно в широких пределах изменять параметры колебательной системы преобразователя. Поскольку данная система является резонансной и собственная частота ее зависит от геометрических параметров капель ртути,

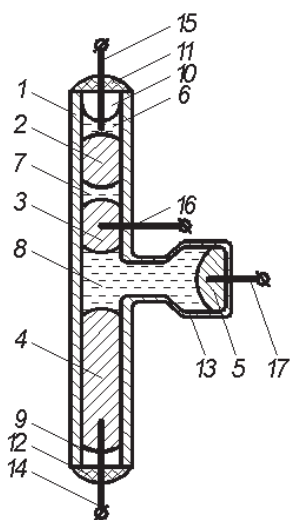


Рис. 1. Электрокапиллярный преобразователь с изменяющейся частотной характеристикой:
 1 — капилляр; 2–5 — ртуть; 6, 7 — раствор KJ; 8 — раствор KJ с ионами ртути (HgJ_2); 9, 10 — газовые пузырьки; 11, 12 — уплотнения; 13 — микрорезервуар; 14–17 — электроды

ем инерционной массы преобразователя.

Управляющий сигнал может быть как непрерывным, так и импульсным. При данной конструкции преобразователя не требуется высокой точности размеров капель ртути, столбиков электролита и газовых объемов при заполнении капилляров для получения преобразователей с идентичными частотными параметрами. Это позволяет получить различные метрологические свойства у одного и того же преобразователя, т.е. получать системы с управляемой массой или управляемой жесткостью, а также использовать преобразователь как элемент самонастраивающихся систем.

Другой метод компенсации недостатка традиционного технологического процесса, заключающегося в трудоемкости изготовления преобразователей с идентичными частотными характеристиками, является конструкция РЭКП с использованием ферромагнитной жидкости, помещенной в неоднородное магнитное поле. На рис. 2 схематично изображена конструкция ртутно-электролитического преобразователя механических колебаний.

то, изменяя массу ртути, находящейся в капилляре, добиваются изменения собственной резонансной частоты.

На рис. 1 изображено устройство указанного электрокапиллярного преобразователя. Стеклокапилляр 1 заполнен каплями ртути 2, 3, 4 и столбиками электролита 6, 7 (водный раствор KJ). В столбиках электролита 8, граничащих с каплями ртути 4 и 5, помимо ионов калия и йода добавлен раствор, содержащий ионы ртути (HgJ_2).

На участке между каплями ртути 3 и 4 к капилляру подсоединен микрорезервуар 13, который гидравлически сообщается с внутренней поверхностью капилляра. Резервуар заполнен электролитом 17. Для изменения частотных свойств преобразователя в процессе его работы или при юстировке на электроды 14, 17 подается в течение необходимого времени питание от источника постоянного тока. При этом осуществляется перенос ртути из капилляра в резервуар (когда электрод 17 служит катодом) или, наоборот, перенос из резервуара в капилляр, сопровождающийся изменением инерционной массы преобразователя.

Устройство содержит двухполюсный постоянный магнит 1 и капиллярную трубку 2, размещенную между его разноименными полюсами, которые установлены вдоль оси трубки. Капиллярная трубка 2 заполнена чередующимися каплями 3, 4 и 5 ртути и каплями 6, 7 и 8 электролита. В каплях 3 и 5 ртути расположена пара электродов 9 и 10, выводы которых подключены к входу усилительно-преобразовательного блока (не показан).

Средство регулировки резонансной частоты преобразователя выполнено в виде капли 11 ферромагнитной жидкости, используемой для регулировки его резонансной частоты и для регулировки чувствительности характеристики преобразования механических колебаний этого РЭКП.

Для этого изменяют расстояние между полюсами постоянного магнита 1, магнитное поле которого взаимодействует с каплей 11 ферромагнитной жидкости, и открытыми торцами трубки 2. Под действием неоднородного магнитного поля этого магнита капля 11 перемещается вдоль оси капиллярной трубки 2 на величину, зависящую от напряженности магнитного поля, что приводит к сжатию газовых объемов 12 со стороны закрытого торца трубки 2. Внешнее вибрационное воздействие, направленное вдоль оси капиллярной трубки 2, вызывает возвратно-поступательное движение капель 3, 4 и 5 ртути и капель 6, 7 и 8 электролита. Это движение обусловлено градиентом давления, пропорционального величине колебательного ускорения и плотности капель ртути и электролита. Капли ртути и электролита имеют различные гидродинамические характеристики, поэтому их совместное движение в капиллярной трубке 2 приводит к деформации и изменению площади границы раздела несмешивающихся фаз, вследствие чего изменяется плотность зарядов двойного электрического слоя на границах их раздела. В результате этого на электродах 9 и 10 преобразователя появляется переменный электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна амплитуде механических колебаний, а частота равна частоте этих колебаний. При изменении напряженности магнитного поля, например, путем изменения расстояния между капиллярной трубкой и полюсами постоянного магнита, происходит перемещение этой капли вдоль капиллярной

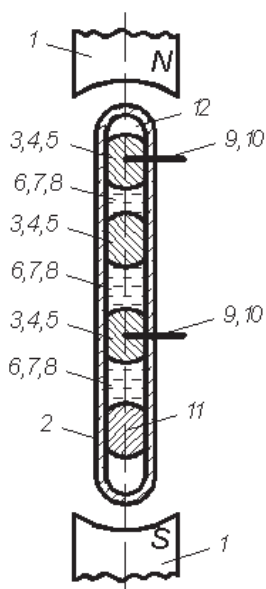


Рис. 2. Электрокапиллярный преобразователь с изменяющейся частотной характеристикой при помощи магнитной системы:

1 — постоянный магнит; 2 — капилляр; 3–5 — ртуть; 6–8 — раствор электролита; 9, 10 — электроды; 11 — капля ферромагнитной жидкости; 12 — газовые пузырьки

трубки, что, в свою очередь, приводит к увеличению относительного перемещения инерционной массы преобразователя (несмешивающихся капель ртути и электролита) относительно стенок трубки. Это приводит к увеличению амплитуды выходного сигнала преобразователя и, следовательно, чувствительности преобразователя к механическим колебаниям.

Благодаря сжатию газового объема l_2 в торце капиллярной трубки 2 происходит изменение резонансной частоты преобразователя, диапазон регулировки которой значительно расширяется по сравнению с известным устройством, вследствие простоты регулировки напряженности магнитного поля постоянного магнита в широких пределах.

Такие способы увеличения идентичности метрологических характеристик пар экземпляров РЭКП требуют точного знания уровня воспринимаемых сигналов, так как системы с ЭМОС склонны к самовозбуждению из-за относительно узкого динамического диапазона. Необходимо отметить, что использование электромеханических связей весьма эффективно при известном динамическом диапазоне вибраций на исследуемых объектах.

Наиболее пригодным является способ, использующий специальные схемы электрической коррекции. Генерируемый ртутно-электролитическим капиллярным преобразователем сигнал проходит через частотозависимый четырехполюсник-корректирующий фильтр, формирующий требуемую АЧХ устройства в целом [3].

Известны два основных метода электрической коррекции. Первый из них заключается в том, что сигнал с РЭКП подается на вход четырехполюсника, имеющего в требуемом диапазоне частот такую частотную характеристику, которая выравнивает частотную характеристику исходного преобразователя: поднимает завалы, подавляет резонансы. Это так называемый метод умножения частотных характеристик, который математически можно записать в следующем виде:

$$(S_1\nu_1)(S_k\nu_k) = S_2\nu_2,$$

где ν_1 — частотная характеристика корректируемого датчика в относительных единицах; ν_k — та же характеристика для корректирующей схемы; ν_2 — та же характеристика для устройства, получаемого в результате коррекции; S_1, S_2, S_k — коэффициенты пропорциональности.

Частотную характеристику корректирующих схем можно выразить уравнением

$$\nu_k = S \frac{\nu_2}{\nu_1},$$

где $S = \frac{S_2}{S_1 S_k}$.

По второму методу погрешности — методу коррекции на основе моделирования — к сигналу РЭКП добавляется часть того же сигнала, преобразованного схемой коррекции таким образом, чтобы получающаяся поправка была равна и противоположна по знаку частотной погрешности преобразователя. При этом сигнал на выходе устройства будет иметь требуемую частотную характеристику.

На рис. 3 приведены обобщенные амплитудно-частотные характеристики преобразователя (ν_1), схемы коррекции ($\eta\nu_1\nu_2$), суммарного сигнала (ν_2).

Математическая запись процесса коррекции по методу моделирования погрешностей имеет вид

$$S_1\nu_1(1 + S_k\nu_k) = S_2\nu_2,$$

где S_1, S_2, S_k — соответствующие коэффициенты пропорциональности.

Сопоставление рассмотренных методов коррекции АЧХ показывает, что оптимальным по целому ряду причин (простота практической реализации, отсутствие активных элементов (усилителей), представляющих собой дополнительные источники шума, что отрицательно сказывается на уровне пороговой чувствительности) является метод умножения частотных характеристик. Поэтому в большинстве случаев предлагаются способы повышения идентичности характеристик экземпляров РЭКП на основе использования пассивных фильтров.

Синтез пассивных фильтров проводится с использованием Г-образных делителей, что позволяет получить довольно простые в настройке схемы электрической коррекции. На рис. 4 приведена схема фильтра в виде Г-образного делителя.

В результате анализа экспериментальных данных выявили, что РС-схемы коррекции АЧХ также не лишены недостатков, которые заключаются в необходимости формировать АЧХ схем сопряжения определенным образом и наличии неравномерности АЧХ в области резонанса РЭКП. Поэтому для окончательного выбора схем электрической коррекции необходимо проведение дополнительных исследований экземпляра РЭКП, к которому она применяется.

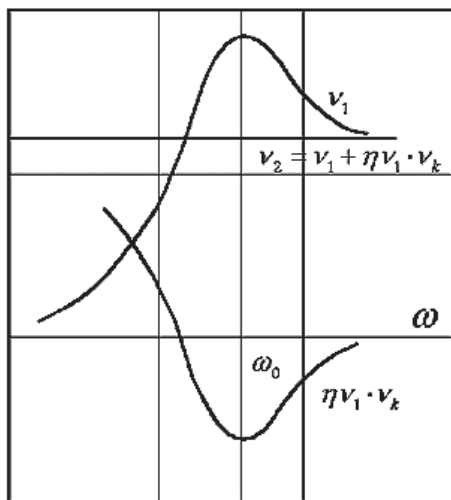


Рис. 3. Обобщенные АЧХ преобразователя (ν_1), схемы коррекции ($\eta\nu_1\nu_2$), суммарного сигнала (ν_2)

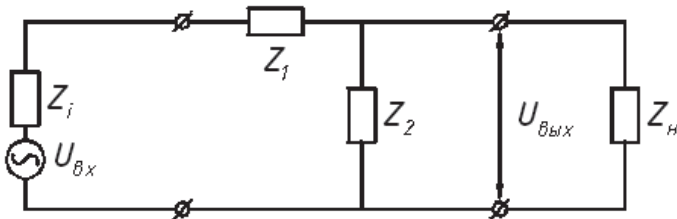


Рис. 4. Схема фильтра в виде Г-образного делителя

Наибольших успехов в изготовлении РЭКП классической конструкции добились в Специализированном конструкторско-технологическом бюро (СКТБ) твердотельной электроники с опытным производством Института прикладной физики АН СССР. Под руководством заведующего сектором СКТБ И.О. Шойхета впервые был оформлен и опубликован комплект технологических документов “Изготовление электрокапиллярного преобразователя ПЭК-3”. По данному традиционному технологическому процессу были произведены тысячи экземпляров чувствительных элементов РЭКП, используемых для общих и специальных целей.

Технологический процесс изготовления чувствительного элемента РЭКП состоит из следующих операций:

- *впайка платиновых контактов*; данная операция предназначена для впайки платиновых контактов в капиллярные трубки;
- *отжиг* — проводится с целью снять внутренние напряжения в стекле после впайки платиновых выводов в капиллярные стеклянные трубки. Отжиг осуществляется в муфельной электрической печи при температуре $540 \dots 610^\circ\text{C}$;
- *напайка выводов*, предназначена для подсоединения гибких медных проводников к платиновым контактам;
- *обрезка концов капиллярных заготовок*; данная операция предназначена для обрезки перетянутых концов капиллярных заготовок;
- *химическая обработка капиллярных заготовок* — проводится в целях очистки капиллярных заготовок от загрязнений;
- *амальгамирование контактов*; данная операция проводится в целях уменьшения контактного сопротивления платиновых контактов, для чего поверхность платины подвергается катодной поляризации в растворе хлорной кислоты. Атомарный водород, выделяющийся на катоде, восстанавливает окисную пленку, и если затем, не прерывая тока, наполнить капилляр ртутью, то ртуть хорошо смочит очищенную поверхность платиновых выводов, образуя амальгаму и улучшая контакт между платиновыми выводами и ртутью;
- *заполнение капиллярных заготовок ртутью и электролитом* с целью их последующей заварки в пламени газовой горелки. Запол-

нение происходит вручную, без использования каких-либо приспособлений, кроме инсулинового шприца. Капли ртути и электролита не нормируются, что и является причиной изготовления экземпляров РЭКП даже с различными резонансными частотами в одной партии.

Традиционный технологический процесс изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) можно охарактеризовать как производство РЭКП с неточно заданными метрологическими характеристиками, в результате чего в одинаковых корпусах в одной партии получают разброс резонансных частот от 30 до 1500 Гц. Далее в результате сложных испытаний из полученной партии отбираются датчики с необходимыми параметрами. Примеры амплитудно-частотных характеристик (1...6) датчиков из одной партии, полученных на этапах калибровки и температурных испытаний, приведены на рис. 5.

Анализ причин, определяющих низкое качество изготовления РЭКП при использовании традиционной технологии, позволил разделить их на три части:

отсутствие целенаправленного формирования метрологических характеристик РЭКП на этапе изготовления чувствительного элемента, что является причиной низкого выхода годных изделий для специальных целей (групп датчиков с идентичными характеристиками);

- отсутствие удобной технологической оснастки для заполнения ЧЭ РЭКП, наличие которой позволило бы сформировать геометрию заполнителей с необходимой погрешностью;

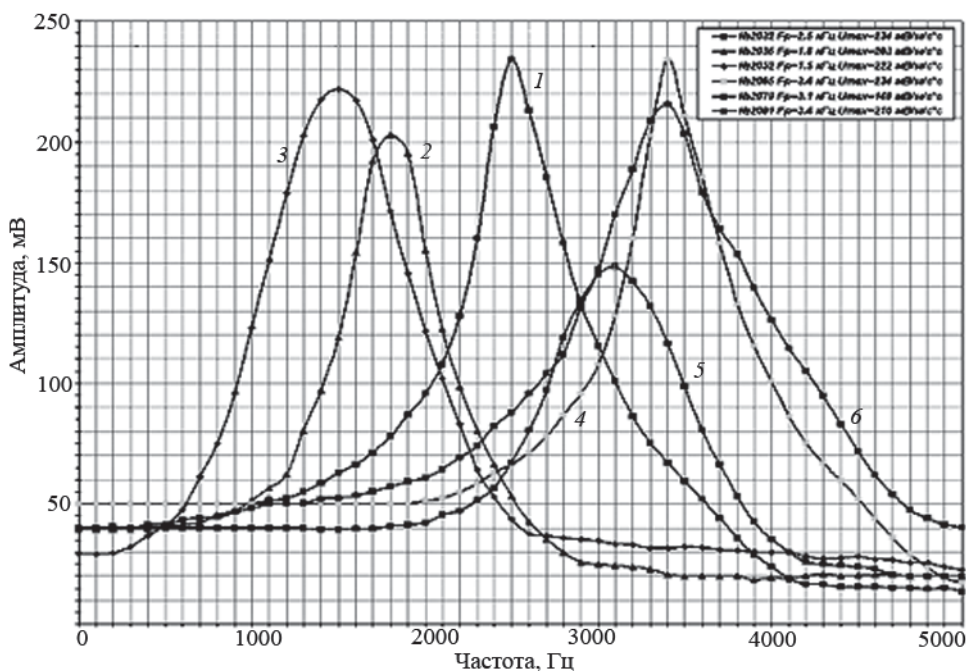


Рис. 5. АЧХ РЭКП, изготовленных в одной партии

• недостаточная чистота используемых компонентов и технологической оснастки при изготовлении ЧЭ, что приводит к низкой временной стабильности преобразователей.

Существенным является отсутствие комплексных исследований, посвященных расчету геометрии компонентов РЭКП в зависимости от требуемых выходных характеристик, а также теоретических и экспериментальных температурных исследований.

Перспективным решением проблемы изготовления партий РЭКП с необходимыми метрологическими характеристиками является разработка технологического процесса с целенаправленным формированием характеристик преобразователей и увеличение точности операции заполнения заготовки чередующимися каплями ртути и электролита.

Для определения зависимостей основных характеристик РЭКП были выведены основные уравнения и граничные условия, описывающие гидродинамические течения в капилляре. Решая эту систему уравнений, установили ряд зависимостей выходных характеристик ЧЭ РЭКП от химических и физических свойств его компонентов, в том числе и для резонансной частоты:

при $l_{\text{возд}1} = l_{\text{возд}2}, \quad l_{\text{рт}1} = l_{\text{рт}2} = \dots = l_{\text{рт}n}, \quad l_{\text{эл}1} = l_{\text{эл}2} = \dots = l_{\text{эл}n}$

$$f_{\text{рез}}(l_{\text{возд}}, l_{\text{рт}}, l_{\text{эл}}) \approx Ag \sqrt{\frac{Cgl_{\text{возд}} + B}{l_{\text{возд}}g(\rho_{\text{рт}}gl_{\text{рт}} + \rho_{\text{эл}}gl_{\text{эл}})}}.$$

При изготовлении ЧЭ РЭКП в серийных условиях химические параметры входящих в состав РЭКП компонентов остаются постоянными во время производства партии (на протяжении не более чем 10 ч), поэтому наибольшее влияние на значение расчетной резонансной частоты оказывают линейные размеры ртути, электролита и газа (рис. 6).

Зафиксировав все входящие в уравнения переменные, кроме линейных размеров компонентов, можно получить зависимость АЧХ РЭКП от погрешности заполнения заготовки ЧЭ РЭКП чередующимися каплями ртути и электролита. Очевидно, что чем меньше погрешность заполнения ЧЭ РЭКП, тем выше идентичность изготовленных в одной партии преобразователей, что является необходимым условием для их использования в корреляционных системах. Для достижения требуемой идентичности резонансной частоты партии датчиков в 3 % необходимо обеспечить погрешность заполнения $\Delta l_{\text{КЧЭ}} \approx 0,01$ мм.

Для обеспечения необходимой точности заполнения заготовки ЧЭ каплями ртути и электролита была разработана технологическая установка. Принцип ее действия заключается в предварительном дозировании каплей ртути и электролита в капилляре меньшего диаметра, чем заполняемый. При прохождении через дозировочный капилляр прослойки “растягиваются”, что дает возможность выбрать подходящую

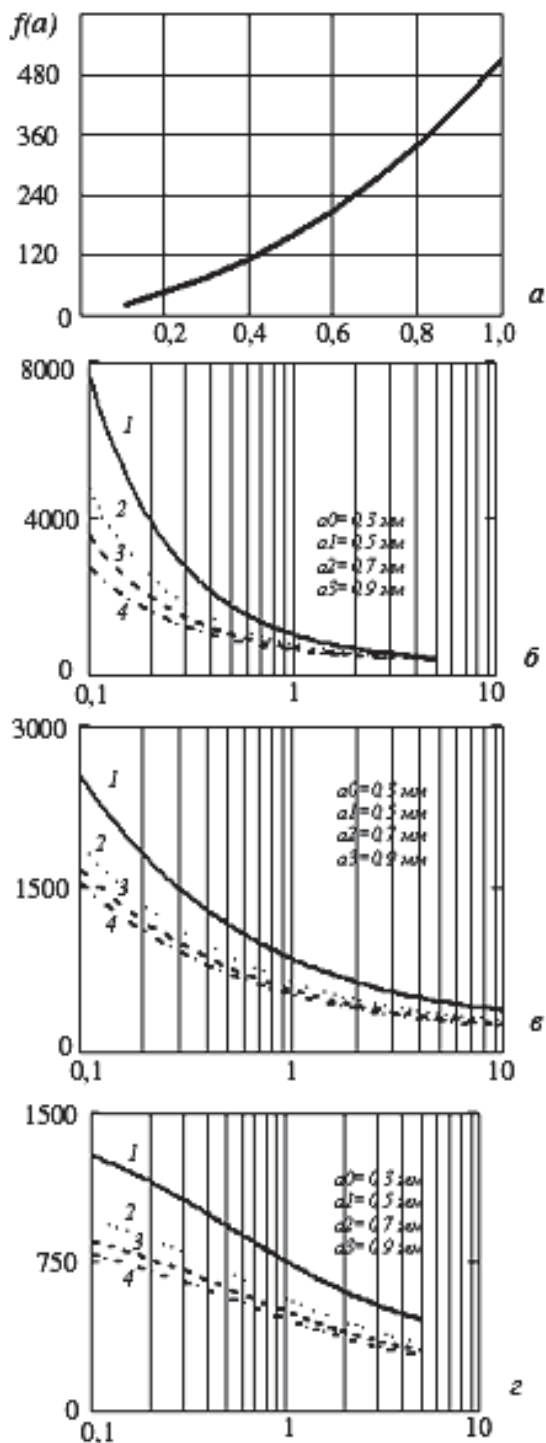


Рис. 6. Графики зависимости резонансной частоты от линейных размеров компонентов РЭКП при $a = 0,1 \dots 1$ мм (а); $0,3 \dots 0,9$ мм (б, в, з); $l_{\text{возд}} = 0,1 \dots 5$ мм (б); const (а, в, з); $l_{\text{пр}} = 0,1 \dots 5$ мм (з); const (а, б, в); $l_{\text{эл}} = 0,1 \dots 5$ мм (в); const (а, б, з)

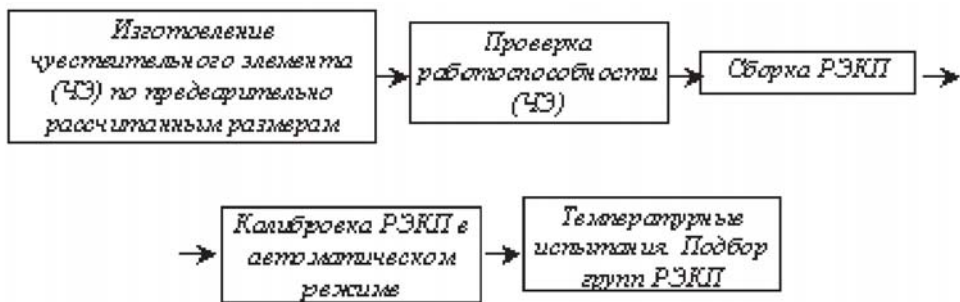


Рис. 7. Структурная схема технологического процесса изготовления РЭКП

конфигурацию прослоек в соответствии с проведенными предварительными расчетами. Линейные размеры компонентов ЧЭ РЭКП измеряются с помощью линейки, закрепленной на стенде. Затем выбранный участок перемещается в заготовку ЧЭ. Таким образом достигается требуемая точность геометрических размеров капель ртути и прослоек электролита в самом ЧЭ РЭКП. Погрешность заполнения капилляра заготовки чувствительного элемента каплями ртути и электролита при использовании приведенной установки равна $\Delta l_{\text{кчэ}} \approx 0,01$ мм.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости резонансной частоты ЧЭ РЭКП от внутреннего диаметра капилляра, длин воздушных капель и прослоек ртути и электролита. Сравнение результатов расчета с использованием критериев Фишера по уравнениям регрессии, полученных на основе экспериментальных данных, и результатов расчета резонансной частоты, проведенного на основе разработанной математической модели, показывает, что расхождение между результатами не превышает 8%. Это говорит о корректности принятых допущений и об адекватности разработанной математической модели РЭКП.

В итоге структурная схема разработанного технологического процесса изготовления РЭКП приняла следующий вид (рис. 7). Данному технологическому процессу предшествует математический расчет геометрических параметров компонентов ЧЭ, реализованный в разработанном программном обеспечении.

Выход годных изделий для применения в специальных целях (использования в корреляционных системах) достигает 75% против 5% изделий, отобранных по традиционной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимзаде М. С., Халилов Р. Ф., Балашов А. Н. Электрокинетические преобразователи информации. – М: Энергия, 1973. – 136 с.

2. Шашурин В. Д., Соленов В. И., Усачев В. А., Синавчиан С. Н. Технология изготовления ртутно-электролитических капиллярных преобразователей / Под ред. В.И.Соленова. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 192 с.
3. Электрические эффекты при колебаниях капилляров, заполненных каплями ртути и раствора электролита / А.И.Балашов, Б.В.Куксенко, Н.М.Либерман и др. // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1988. – № 2. – С. 131–136.
4. Синавчиан С. Н., Синавчиан В. С. 12-канальный бортовой виброметр ВМ-12 // Доклады Третьего международного аэрокосмического конгресса. – М., 2000. – С. 85–92.
5. Синавчиан С. Н., Соленов В. И. Применение электро-капиллярных преобразователей в авиации // Доклады V Международной научно-технической конференции АВИА-2003. – Киев, 2003. – С. 67–75.
6. Синавчиан С. Н., Соленов В. И., Никитин А. П. Физические аспекты применения электро-капиллярных преобразователей // Вестник НАУ (Киев). – 2003. – Вып. 6. – С. 61–70.

Статья поступила в редакцию 26.01.2006

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 radioelectronics and radio-technical systems.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла из печати книга**

Козинцев В.И. Основы импульсной лазерной локации / Учебное пособие для вузов, 2006 г., 512 с.

Изложены физические основы импульсной лазерной локации. Приведены сведения об оптических свойствах земной атмосферы, отражающих свойствах земной и морской поверхностей и объектов локации. Описаны эффекты, возникающие при распространении лазерных пучков в атмосфере. Рассмотрены методы расчета лазерных сигналов на трассе с отражением от неровной земной и взволнованной морской поверхностей, от светотражателей и от объектов сложной формы. Описаны помехи в системах лазерной локации. Изложены теоретические основы приема лазерных сигналов. Приведены примеры лазерных локационных систем различного назначения и описаны их основные элементы. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который читается в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, обучающихся по направлению “Оптехника”, а также для научных работников и инженеров приборостроительного профиля.