

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ
ДЛЯ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ

Общие замечания. Построение электрометрической аппаратуры для измерения постоянных и медленно меняющихся токов в диапазоне (10^{-13} до 10^{-17} а) и электрических зарядов в диапазоне (10^{-12} до 10^{-16} к) связано со значительными трудностями. Эти трудности заключаются в основном в отсутствии специальных элементов и узлов промышленного изготовления для входных цепей электрометров. К таким специальным узлам и элементам относятся конденсаторы: динамические, накопительные, разделительные, коммутирующие элементы и входные изоляторы. Основными требованиями при этом являются: высокое сопротивление изоляции (до 10^{17} ом), малый наброс заряда при коммутациях во входной цепи (10^{-14} к и менее), малый ток, генерируемый изоляторами при изменяющихся внешних условиях, малый дрейф контактной разности потенциалов между рабочими поверхностями пластин динамического конденсатора (1-2 мв/сутки и менее).

Опыт показывает, что выполнить комплекс перечисленных требований не представляется возможным без глубокой проработки конкретных теоретических и практических (особенно технологических) вопросов, связанных с созданием специальных электрометрических узлов и элементов. Так, например, входное сопротивление схемы, построенной на серийно выпускаемых узлах, не мо-

жет быть большим 10^{13} ом. Паразитные токи изоляторов входной цепи при изменении условий (температуры, влажности, давления) могут достигать 10^{-14} а и более, а при неудачном подборе материала - плохом изготовлении изоляторов и несоблюдении гигиены сборки - паразитные токи даже высококачественных изоляторов (янтарь, эскапон) могут оставаться на этом уровне в течение длительного времени. Паразитные заряды, генерируемые при размыкании контактов, в серийно выпускаемых промышленностью коммутационных устройствах (малошумящие реле, переключатели) могут достигать 10^{-13} к и более [1] .

С целью повышения чувствительности электрометрической аппаратуры для измерения малых токов и зарядов, способной производить измерения как в нормальных, так и в тяжелых климатических и механических условиях, автором с сотрудниками был проведен ряд разработок, в результате которых были созданы специальные узлы для электрометрических схем: динамические конденсаторы ДРК-2, ДРК-2А, ДРК-3 и ДРК-4, накопительные конденсаторы НК-1, разделительные конденсаторы РК-1, коммутационные реле РВ-2А, РВ-3, РВ-4 и РВ-4А, а также проведены исследования высококачественных изоляционных материалов.

Для измерения параметров перечисленных выше узлов при их сборке, регулировке и проверке были разработаны специальные стенды. Полученные при этом результаты позволяют надеяться, что содержание выполненных работ может представить интерес для широкого круга читателей. Изложение этих вопросов и является основной целью данной статьи.

Исследования и рекомендации по выбору изоляционных материалов. При создании перечисленных устройств вопрос выбора материала изоляторов является одним из самых основных. Так как в литературе вопрос о паразитных токах изоляторов освещен очень слабо, то были проведены специальные исследования наиболее широко применяемых в электрометрии изоляторов, таких как янтарь, эскапон, фторопласт-4Н, керамика (ГОСТ 5458-54, класс IУ). Измерения проводились на образцах объемом около 1 см^3 на стенде, представляющем собой электрометр с динамическим конденсатором, где исследуемый образец изолятора являлся изолятором центральной пластины динамического конденсатора. Схема входного устройства для этого случая приведена на рис. I.

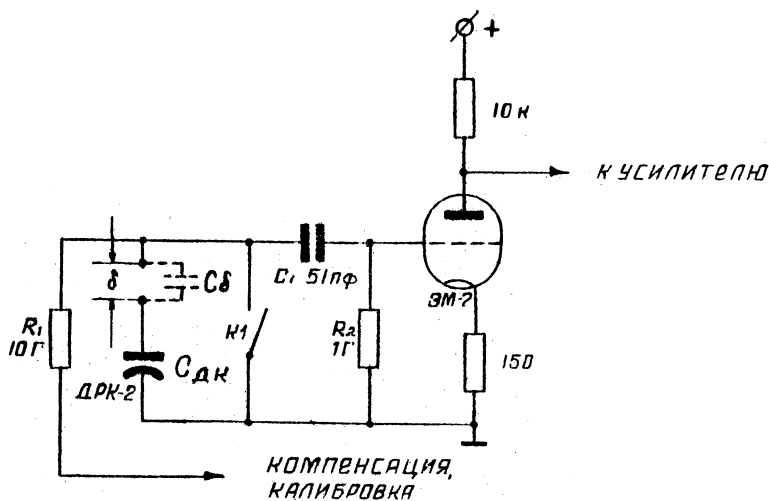


Рис. I. Схема для исследования изоляторов динамического конденсатора

Зазор δ между центральным штырьком ДРК и входным контактом усилителя образует воздушный конденсатор C_{δ} , емкость которого очень мала, а именно $C_{\delta} \ll C_{дк}$. При введении в схему такого конденсатора без диэлектрика схема реагирует только на заряды, появляющиеся на исследуемом изоляторе (в рис. I на этом изоляторе крепится верхняя пластина $C_{дк}$), а заряды на остальных изоляторах (левая пластина C_1) не оказывает практически никакого влияния. Действительно, заряд на $C_{дк}$ создает на емкости динамического конденсатора напряжение, которое определяется только этой емкостью. Емкости C_{δ} и C_1 , шунтирующие емкость $C_{дк}$, не будут при этом оказывать влияния, так как емкость C_{δ} мала. С другой стороны заряд, возникающий на всех остальных изоляторах, не создает на динамическом конденсаторе сколь-либо заметного напряжения по той же причине. Таким образом, в данной схеме модулироваться динамическим конденсатором и, следовательно, передаваться на выход усилителя, будут только те напряжения, которые возникают при генерировании заряда исследуемым изолятором. Замыкание кнопки $K1$ при наличии зазора δ позволяет сбросить заряды со всех изоляторов, кроме исследуемого, а при закороченном зазоре δ - со всех изоляторов, в том числе и с исследуемого.

При наличии зазора δ коэффициент передачи такой схемы от динамического конденсатора к выходу, естественно, отличается от того, который имеет место при отсутствии зазора. Для определения этого коэффициента передачи использовался следующий порядок калибровки.

При отсутствии зазора δ через резистор R_1 на вход преобразователя подавалось напряжение заведомо большее контактной разности потенциалов пластин динамического конденсатора (которая предварительно компенсировалась). Это напряжение заряжало динамический конденсатор. Затем устанавливался воздушный зазор и определялся выходной сигнал преобразователя. Искомый коэффициент передачи при наличии зазора δ_1 определялся по отношению этого сигнала к напряжению, до которого был заряжен динамический конденсатор.

На выходе схемы по рис. I использовался транзисторный усилитель переменного тока, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Усилитель выполнен на трех транзисторах и рассчитан на подсоединение к выходу серийно выпускаемых приборов: вольтметра переменного тока ВЗ-13 или осциллографа СИ-1.

Измерения производились следующим образом. После калибровки стенда с целью определения коэффициента передачи по напряжению динамический конденсатор вдвигался в специальное гнездо до замыкания зазора δ , кнопкой К1 вход замыкался накоротку, затем кнопка К1 размыкалась и фиксировалась контактная разность потенциалов динамического конденсатора. Затем динамический конденсатор выдвигался до получения фиксированного зазора δ и через определенные промежутки времени фиксировалось напряжение на динамическом конденсаторе. Наблюдение за каждым образцом велось от нескольких минут до нескольких часов. Зная приращение напряжения на динамическом конденсаторе за некоторый промежуток

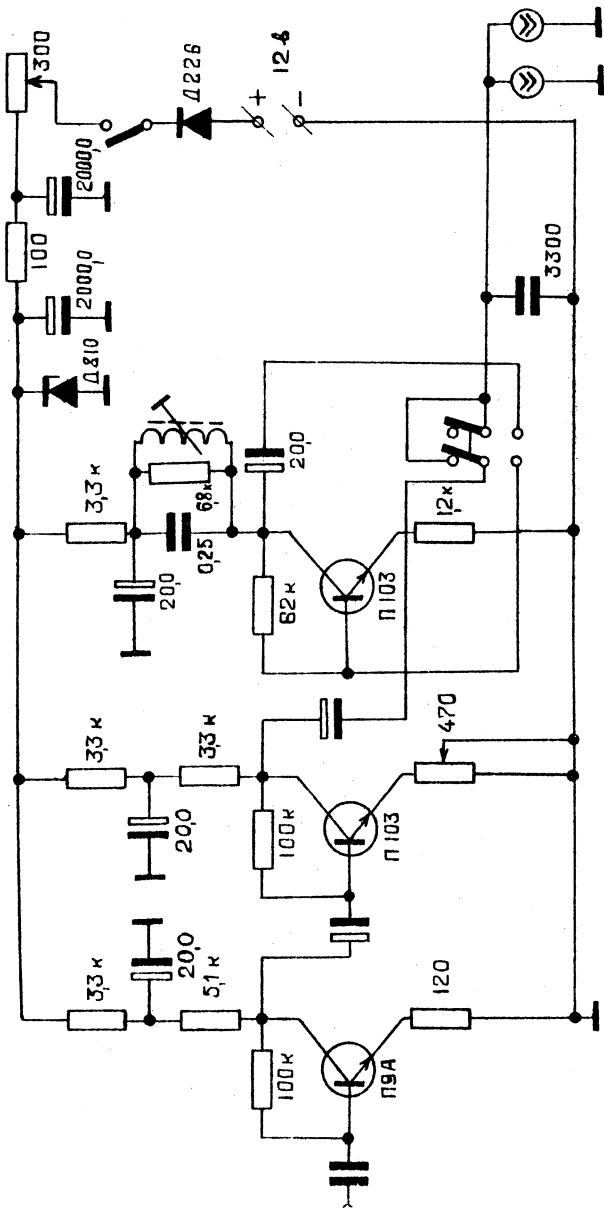


Рис.2. Схема усилителя переменного тока

времени и его емкость, легко подсчитать заряд или ток исследуемого изолятора.

Исследования изоляторов проводились при нормальных условиях, при повышенной температуре и после 48-часового воздействия влаги (относительная влажность 98%) при температуре 40°C. Полученные результаты приведены в табл.1-3. В табл.4 приведены данные по максимальной скорости натекания зарядов, полученные по данным табл.1-3, а также данные по сопротивлению изоляции изучаемых материалов при нормальной температуре, при температуре 70°C и после 5-часовой выдержки при относительной влажности 98% и температуре 40°C. В этой же таблице, кроме того, даны механические характеристики эскапона, керамики, янтаря и фторопласта.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие предварительные выводы:

1. В настоящее время из имеющихся изоляционных материалов наиболее подходящим для входных цепей электрометров следует считать эскапон, который особенно пригоден для аппаратуры, работающей в тяжелых климатических и механических условиях.

2. Янтарь может быть применен для аппаратуры, работающей в нормальных условиях или в герметизированных блоках, в которых обеспечивается нормальная влажность. По механическим свойствам (хрупкость) янтарь значительно уступает эскапону.

3. Керамику пужно считать непригодным материалом для изоляторов при измерении токов (10^{-15} + 10^{-17} а). При измерении

токов более 10^{-14} а в тех случаях, когда высокая прочность и стабильность размеров играет основную роль, керамика, обработанная по поверхности водоотталкивающим лаком (например, лаком ФГ-9), может быть применена в герметичных блоках.

4. Фторопласт-4 может быть использован в качестве проходных герметизирующих изоляторов, работающих при повышенной влажности. Наиболее хорошо сохраняет свои параметры во влажной среде полированный фторопласт-4, однако по механическим свойствам (мягок, обладает холодной текучестью), он совершенно непригоден для опорных изоляторов, где требуется сохранение определенных зазоров между деталями.

Помимо исследованных изоляционных материалов, в электрометрических схемах часто применяют полистирол. По своим свойствам полистирол подходит для изоляторов входных цепей электрометров, но из-за слабой температурной прочности может быть использован только в лабораторных приборах.

В настоящее время делаются попытки применить в качестве изоляционного материала во входных цепях электрометров минерал сапфир. С этой точки зрения заслуживают также большого внимания новые марки изоляционного материала ситалла, обладающего большой твердостью и большим сопротивлением изоляции ($10^{15} + 10^{16}$ Ом).

Выбирая изолятор, необходимо помнить, что в ряде случаев он должен обеспечивать и соответствующие механические свойства, в частности высокую твердость и малый коэффициент линейного расширения. Это необходимо в тех случаях, когда требуется

сохранение определенных размеров между сопрягаемыми через изолятор деталями. Так, например, электрические параметры динамического конденсатора сильно зависят от взаимного расположения пластин, одна из которых крепится на изоляторе. Деформация изолятора может вызвать сдвиг одной пластины относительно другой, следовательно, изменятся и электрические параметры, особенно остаточная некомпенсируемая э.д.с. Такие же требования к изоляторам возникают и в бездребезговом реле, где для отсутствия дребезга в контактах в момент их замыкания требуется вполне определенное положение контактов относительно друг друга и даже небольшое изменение расстояния между ними может вывести реле из строя.

Технология обработки и крепления изоляторов. Большое влияние на сопротивление и другие характеристики изоляторов оказывает технология обработки поверхности. Для изоляторов, изготовленных из янтаря или эскапона, хорошие результаты дала следующая технология полировки и промывки поверхности. Боковую поверхность изолятора полируют на байковой шайбе с полировочной пастой 290, разведенной уайт-спиритом. При полировке изоляторов, особенно из янтаря, во избежание появления трещин и оплавлений во время полировки не следует сильно прижимать и подвергать длительной обработке одно место. Торцовые поверхности изолятора полируют замшевой шайбой с пастой 290, разведенной уайт-спиритом; замша наклеивается на диск, не имеющий торцового биения. На замшевую поверхность во время вращения

наносится слой пасты. Изолятор слегка прижимают к рабочей поверхности шайбы и полируют до устранения всех следов механической обработки и царапин. Во время полировки изолятор смачивают раствором пасты в уайт-спирите. После полировки изоляторы тщательно промывают мягкой кисточкой в гидролизном спирте до полного удаления полировочной пасты и просушивают при температуре $(50 \pm 10^{\circ}\text{C})$ в течение 30 мин. После просушки производят чистовую полировку также на дисковой шайбе, покрытой замшей, но уже без пасты. Для этого, периодически прикасаясь не более чем на $1 \pm 1,5$ сек плоскостью изолятора к рабочей поверхности замшевой шайбы, производят полировку до устранения мельчайших царапин, оставшихся после первичной полировки, затем с помощью мягкой кисточки тщательно промывают изолятор этиловым спиртом высшей очистки (ВО) и воздуходувкой сдувают все капли до появления равномерного блеска. Наконец, изолятор просушивают в термощкафу при температуре $(50 \pm 60^{\circ}\text{C})$ в течение часа. Готовые изоляторы хранят в эксикаторе.

Полировка изоляторов из фторопласта производится тоже по приведенной выше технологии с той лишь разницей, что просушка может вестись при температуре $(100 \pm 120^{\circ}\text{C})$. Полировка производится до удаления следов механической обработки и появления равномерного блеска.

Керамические изоляторы обрабатываются следующим образом. Изоляторы кипятятся в дистиллированной воде в течение часа, затем в нагретом состоянии переносятся в термощкаф и просуши-

ваются при температуре 150°C . После просушки изоляторы погружаются в лак ФГ-9 и помещаются в вакуумную печь, где происходит пропитка лаком. Извлеченные из лака изоляторы помещаются в центрифугу для сбрасывания лишнего лака, далее в термоскаф с температурой 100°C . После двух часов сушки температура в шкафу повышается до 170°C , и в такой температуре изоляторы выдерживаются 4 часа. Готовые изоляторы хранятся в эксикаторе.

Одним из важнейших является вопрос крепления проходных контактов (или выводов) в изоляторах. В большинстве случаев проходные герметичные контакты являются опорными для крепления ответственных деталей. Например, в динамическом конденсаторе к изолятору крепится измерительная пластина, при этом требуется, чтобы она сохраняла определенное положение в течение всего срока службы конденсатора. Это накладывает особенно жесткие требования на выбор системы крепления изолятора.

В настоящее время используются различные методы крепления проходных контактов. Выбор метода крепления зависит от материала изолятора и количества выводов.

На рис.3 показаны некоторые конструктивные решения узлов крепления и герметизации проходных контактов. В динамическом конденсаторе (рис.3,а) изолятор для центральной пластины имеет одно центральное отверстие, в котором механически крепится проходной контакт. В качестве уплотнительной прокладки используется мягкая алюминиевая шайба.

В изоляторах с несколькими проходными выводами (например,

у накопительного конденсатора их шесть, разделительного - три, реле РВ-3 - четыре, реле РВ-4 - пять) крепление осуществляется с помощью заливочных компаундов на основе смолы ЭД-5. Ввиду того, что расстояния между выводами малы (около 3 мм), заливку необходимо производить осторожно, в два этапа. На первом этапе берется небольшое количество смолы - лишь столько, чтобы за счет поверхностного натяжения смола проникла вдоль вывода и у нижнего края изолятора перекрыла вокруг вывода зазор. После ее отверждения заливка производится окончательно с заполнением смолой зенковки в изоляторе. На рис.3,б показан такой изолятор с залитым выводом.

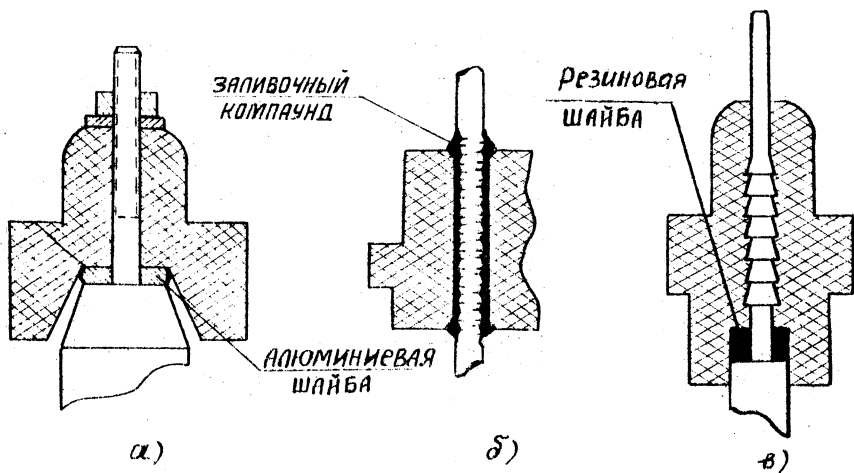


Рис.3. Крепления и герметизация проходных элементов

При использовании фторопласта-4 наиболее удобной является конструкция проходного изолятора, показанная на рис.3,в. В этом случае вывод в месте прохождения через изолятор снабжается насечкой, а уплотнение производится с помощью резиновой шайбы.

Использование заливочных компаундов может оказать сильное влияние на электрические параметры изоляторов: сопротивление изоляции и уровень паразитного тока. Проведенное исследование с целью отыскания лучшего с этой точки зрения компаунда позволило сделать следующие выводы:

1. При неточном соотношении компонентов в смоле, а именно при избытке непрореагировавшего отвердителя (полиэтилен-^oполиамин), на изоляторе вокруг выводов появляется малозаметная ореольная пленка. Ореол со временем расширяется и при соприкосновении с ореолом другого контакта или корпусом сопротивление изолятора между выводами или выводом и корпусом резко падает, примерно до 10^{12} ом.

2. Для заливки выводов в высокоомных элементах можно рекомендовать компаунд следующего состава (в весовых частях): смола ЭД-5(10 в.ч.), пластификатор ДЭГ-1(2 в.ч.), отвердитель Л-20(9,6 в.ч.). Режим полимеризации этого компаунда: 24 часа на открытом воздухе при температуре $(25 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, 4 часа в термостате при температуре 40°C , 4 часа в термостате при температуре 80°C , охлаждение вместе с термостатом до 25°C .

Динамические конденсаторы. При измерении малых токов и

зарядов наибольшую чувствительность обеспечивают системы с преобразованием постоянного тока в переменный, основанные на использовании динамического конденсатора с периодически изменяющейся емкостью. Входное сопротивление динамического конденсатора определяется только утечками по изолятору между пластинами и может быть обеспечено в пределах $10^{14} + 10^{17}$ ом .

В настоящее время известен целый ряд конструкций динамических конденсаторов. Почти во всех конструкциях изменение емкости происходит за счет изменения зазора между пластинами конденсатора. Гораздо реже встречаются конструкции, в которых изменение емкости осуществляется периодически изменением площади взаимодействия пластин конденсатора за счет вращения сегмента или группы сегментов. Такие конструкции получаются громоздкими и, кроме того, имеют большую остаточную некомпенсированную э.д.с. (до нескольких милливольт). Последнее объясняется тем, что в течение одного периода модуляции взаимное расположение противоположащих сегментов непрерывно меняется и это затрудняет компенсацию контактной разности потенциалов. В динамических конденсаторах, работающих на принципе изменения зазора между пластинами, остаточная э.д.с. значительно меньше (5+20 мкв).

Автором за последние годы разработан ряд конструкций динамических конденсаторов с изменяющимся зазором. Первый из них - язычковый симметричный конденсатор с электромагнитным возбуждением типа ДРК-I (динамический резонансный конденсатор первой модели) не имел обратной связи по резонансной

частоте подвижной пластины и, несмотря на такие положительные свойства, как малое потребление энергии и высокая стабильность коэффициента модуляции, оказался непригодным для работы в широком диапазоне температур из-за трудности стабилизации частоты генератора возбуждения.

Последующие модели (ДРК-2, ДРК-2А, ДРК-3 и ДРК-4) подобны между собой и отличаются друг от друга небольшими конструктивными особенностями, связанными с различными условиями их эксплуатации. Так, например, конденсатор ДРК-2 имеет изолятор, изготовленный из керамики, обработанной лаком ФГ-9, и может быть использован лишь при измерениях токов не менее 10^{-14} а. Данный конденсатор наиболее вибропрочен. ДРК-2А имеет янтарный изолятор и может применяться при измерениях токов 10^{-15} а и более. ДРК-3 предназначен для измерения токов от 10^{-16} а, а отдельные экземпляры могут быть использованы для измерения токов от 10^{-17} а. ДРК-4 отличается от ДРК-3 тем, что имеет встроенные разделительный конденсатор и разделительный резистор для связи модулятора с усилителем переменного тока.

На рис.4 общий вид динамического конденсатора ДРК-2, конструкция которого является типовой [2]. Конденсатор относится к язычковому типу. Стойка I является базовой деталью конденсатора, связывающей воедино все его узлы. Две колебательные пластины 2 плотно зажаты в основании стойки и образуют систему типа камертона. В верхней части стойки, напротив пластин, расположены два электромагнита 3, пред-

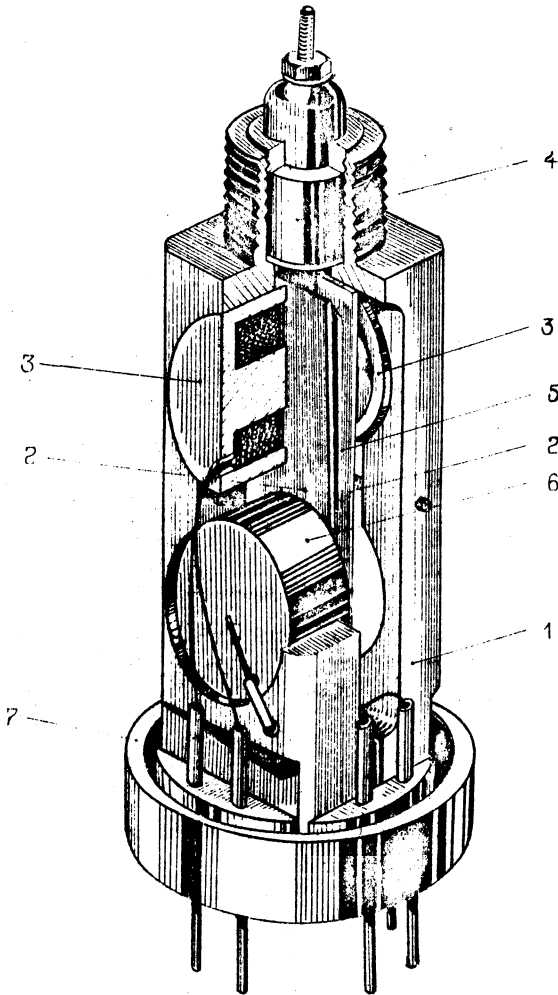


Рис.4. Конструкция конденсатора ДРК-2

назначенных для возбуждения колебательных пластин. У основания стойки, напротив одной из колебательных пластин, установлен третий электромагнит 6, используемый для создания обратной связи в возбуждающем генераторе. Между колебательными пластинами в центре зазора расположена измерительная пластина 5, плотно закрепленная в изоляторе 4. Основание 7 изготовлено из пресспорошка и служит для крепления выводов электромагнитов и для герметичного сочленения конденсатора с кожухом.

Схема генератора приведена на рис.5. Катушки возбуждения динамического конденсатора обозначены L_1 и L_2 , а катушка обратной связи - L_{oc} . Генератор выполнен по стандартной схеме на трех полупроводниковых триодах типа П103.

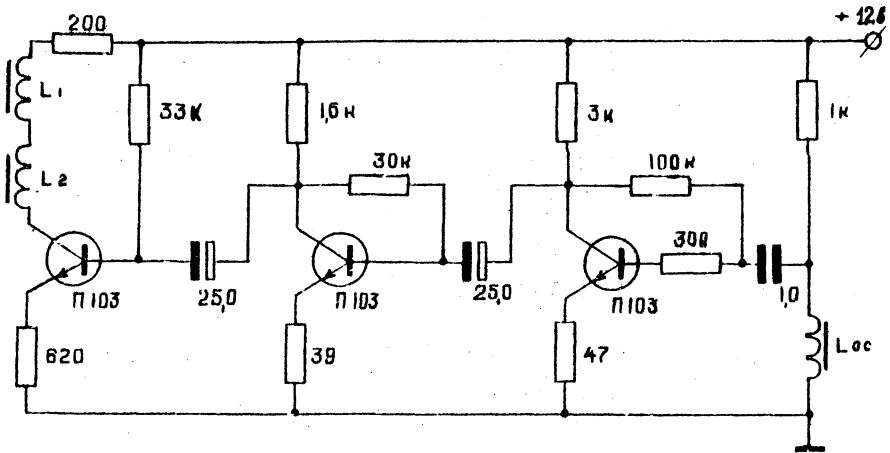


Рис.5. Схема генератора для динамического конденсатора

Важнейшие требования, предъявляемые к динамическим конденсаторам, следующие: малый дрейф контактной разности потенциалов (дрейф нуля), малые паразитные токи изолятора, малая остаточная некомпенсируемая э.д.с., высокая стабильность коэффициента модуляции, малое потребление энергии на поддержание колебаний, высокая стабильность частоты преобразования.

Рассмотрим, каким образом обеспечивается выполнение этих требований в динамических конденсаторах серии ДРК.

Контактная разность потенциалов между пластинами зависит от различия в структурах поверхностных слоев пластин и химической активности состояния их поверхностей [3]. Для стабилизации контактной разности потенциалов в большинстве известных динамических конденсаторов поверхность пластин после тщательной обработки и очистки золотят методом вакуумного напыления, но и такой метод защиты поверхности не устраняет полностью дрейф нуля. Золочение имеет также тот недостаток, что при случайных перегрузках пластины соприкасаются друг с другом и покрытие нарушается.

В конденсаторах типа ДРК золочение пластин не применяется. Материалом пластин служит никелевый сплав 79НМ, обладающий и хорошими магнитными свойствами и малой химической активностью. При этом в лучших образцах конденсаторов удается снизить дрейф нуля до уровня менее 100 мкв за 24 час, т.е. до таких же значений, какие удается получить в лучших образцах конденсаторов с золочением пластин.

Уменьшение паразитных токов достигается за счет уменьшения объема изолятора, тщательной обработки его поверхности и рационального выбора системы его крепления.

Для уменьшения остаточной некомпенсируемой э.д.с. применяется регулировка зазоров между рабочими поверхностями боковых и измерительной пластин, а также балансировка магнитного потока катушек возбуждения.

Высокая стабильность коэффициента модуляции достигнута за счет использования генератора с положительной обратной связью, который работает на резонансной частоте колебательных пластин. Этим же обеспечивается и малое потребление энергии в катушках возбуждения и высокая стабильность частоты преобразования.

Частота возбуждения определяется резонансными свойствами колебательных пластин. Нестабильность частоты в диапазоне температур от -50 до $+65^{\circ}\text{C}$ не превышает $\pm 1,5$ гц при резонансной частоте 275 гц.

Основные технические данные рассмотренных динамических конденсаторов, общие для всех типов, следующие: статическая емкость 15 ± 5 пф, коэффициент преобразования не менее 0,2, резонансная частота от 260 до 290 гц, мощность, рассеиваемая в катушках возбуждения, от 30 до 50 мва. Остальные технические характеристики приведены в табл.5 и 6.

Ниже приводятся некоторые технологические особенности изготовления, сборки и регулировки конденсаторов типа ДРК.

Пластины конденсаторов изготавливаются из пермаллоя марки 79НМ толщиной 0,35 мм. Лента пермаллоя разрезается на полосы, причем используется только средняя часть ленты, а не край (до 30 мм). Ленты промывают бензином БР-1 и протирают чистой салфеткой. Затем их пропускают несколько раз на рихтовочных вальцах, переворачивая каждый раз другой стороной и регулируя вальцы до тех пор, пока заготовка не будет выходить из-под них прямой. Заготовка лент снова промывается бензином и протирается салфеткой. Две боковые и одна центральная пластины штампуются с удержанием деталей в заготовке, т.е. после вырубki пластин верхним пуансоном, нижний запрессовывает их назад в ленту. Одновременно лента разрезается на части, по одному комплекту пластин в каждой. Такие заготовки ленты поступают на сборку. Как показал опыт, соблюдение указанных предосторожностей обеспечивает получение наименьшей контактной разности потенциалов между пластинами конденсатора.

Сборщик вынимает комплект пластин из ленты, снимает заусенцы и рихтует их под лекальную линейку, после чего полирует их на фетровой шайбе пастой ГОИ, пользуясь приспособлением для удержания пластин, затем промывает бензином, протирает папиросной бумагой и батистом, проверяет рихтовку, протирает папиросной бумагой, смоченной этиловым спиртом высшей очистки, и снова протирает батистом. Пластины хранятся комплектно в специальных кассетах.

После этих операций пластины с помощью точечной микросварки привариваются нерабочей частью к рейкам, которые размещают в специальных закрытых кассетах из пермаллоя, и направляются на вакуумный отжиг. Температура отжига 850°C . После отжига пластины при необходимости подрихтовываются и слегка полируются до равномерного блеска на войлочной шайбе с пастой 290, промываются в бензине и этиловом спирте высшей очистки, просушиваются при температуре $70+80^{\circ}\text{C}$ и протираются бязью. Перед сборкой пластины промываются петролейным эфиром и протираются бязью.

При сборке конденсатора пластины устанавливаются так, чтобы они были повернуты друг к другу именно теми сторонами, которые в ленте были на одной поверхности. Для различия сторон на каждой пластине срезан уголок. При этом производится подгонка резонансных частот пластин. Разница в резонансных частотах двух вибрирующих пластин в каждом конденсаторе не должен превышать 0,5 гц. Для подгонки частот производится подпиливание пластин у основания в стойке.

Для проверки свойств динамических конденсаторов и их настройки разработан специальный стенд. Он состоит из схемы входного преобразователя по рис.1 и схемы усилителя переменного тока по рис.2. В стенде предусмотрено гнездо для подключения испытуемого конденсатора. С помощью стенда можно измерять дрейф контактной разности потенциалов, паразитные токи изоляторов, определять контактную разность потенциалов и некомпенсируемую э.д.с. и т.п.

Электрометрические реле. Основными требованиями, предъявляемыми к коммутирующим реле в электрометрических схемах, являются большое сопротивление изоляции между контактами ($10^{14} + 10^{16}$ ом) и малый наброс заряда (10^{-15} к и менее) в момент коммутации.

В табл.7 приведены результаты экспериментального определения наброса заряда промышленных реле типа РЭС-10 и вновь разработанных реле РВ-2А и РВ-3. Как видно из табл.7, промышленные реле РЭС-10 имеют наброс заряда более 10^{-13} к. Если учесть, что контакты подобных реле не имеют экранировки и сопротивление изоляции между ними не превышает 10^{13} ом, то ясно, что подобные реле непригодны для входных цепей электрометров.

При разработке новых электрометрических реле было выяснено, что основная причина наброса заряда в момент коммутации связана с перемещением контакта в электростатическом поле изолятора. Экранирование контактов от изоляторов металлическим экраном уменьшает наброс, однако не до нуля. Этот остаточный наброс заряда возникает вследствие наличия контактной разности потенциалов между контактом и экраном.

Для его уменьшения необходимо экран устанавливать дальше от подвижного контакта, желательно изготавливать их из одного и того же материала, полезным является соединение экрана с подвижным контактом.

Проведенный анализ причин наброса заряда позволил в значительной мере устранить это нежелательное явление.

В результате были созданы следующие коммутирующие элементы.

Реле РВ-2А (реле высокоомное второй модели в проходном корпусе) предназначено для коммутации входных цепей электрометрических блоков. Реле имеет три контакта, из которых два нормально замкнутые.

Реле РВ-3 - специальное бездребезговое реле, предназначенное для коммутации контура ударного возбуждения в электрометрическом измерителе малых токов с накопительной емкостью. Помимо большого сопротивления изоляции между контактами, реле имеет малый наброс заряда (10^{-15} к) и малое время установления переходного процесса в контактах (менее 2 мксек). Реле имеет два нормально замкнутых контакта.

Реле РВ-4 с тремя контактами, из которых два нормально замкнуты. По сравнению с РВ-2А реле РВ-4 имеет малый наброс заряда (10^{-15} к) и меньшую межконтактную емкость.

На базе реле РВ-4 изготовлено реле РВ-4А, имеющее три нормально замкнутых между собой контакта. При подаче напряжения на электромагнит все контакты размыкаются. Реле имеет большое сопротивление изоляции между контактами и малый наброс паразитного заряда.

При разработке бездребезгового реле РВ-3 основная трудность заключалась в устранении дребезга контактов в момент замыкания. Дребезг присущ всем обычным реле и переключателям. Время дребезга у разных коммутирующих устройств различно и, как показали исследования, лежит в пределах от 2 до 10мсек.

Причина дребезга [4] заключается в следующем. При соударении контактов кинетическая энергия движущегося контакта частично превращается в энергию упругой деформации, а частично в энергию необратимой деформации, например, работу пластической деформации или трения. В металлических контактах с частотой коммутации пластические деформации появляются только в начале работы, а потом деформации становятся в значительной степени упругими и появляется дребезг (вибрация) контактов.

При исследованиях в реле РВ-3 были найдены такие соотношения зазора между контактами и углом встречи контактов (табл.8), при котором дребезг контактов исчезает. Кинетическая энергия контактов при этом полностью расходуется на работу трения между контактами, встречающимися при замыкании под углом.

На рис.6 показана конструкция реле РВ-3, которая является типовой для всех перечисленных выше реле. Все реле находятся в корпусах, рассчитанных на проходное герметичное крепление. В корпусе находится электромагнит I и контактная группа 2, отделенная воздушным зазором 3 от электромагнита. Воздушный зазор 3 определяется дистанционным кольцом 4, зажатым между изолятором контактной группы 5 и электромагнитом. Контакты 6 реле расположены между изолятором 7 и диском 8. Выводы 9 контактов закреплены в изоляторе. Один из контактов имеет подложку IO из ферромагнитного сплава 79НМ,

выполняющую роль якоря. Диск 8 изготовлен из ферромагнитного и диамагнитного материалов в таком сочетании, что магнитное поле электромагнита через воздушный зазор и диск концентрируется в точке, над которой расположена подложка контакта, в результате подложка с контактом притягивается к диску.

Выводы диска являются выводами подвижного контакта. Над подвижным контактом расположен экран II. Контакты в реле РВ-3 выполнены из золотого сплава Зл-Н5 толщиной 0,15 мм в виде треугольной и прямой рамок. Изолятор обрабатывается по приведенной выше технологии. Контакты после запрессовки и приварки полируются и промываются спиртом В0. Перед сборкой контакты проверяются на отсутствие вмятин и царапин на рабочей поверхности. Воздушный зазор между диском и плоскостью дистанционного кольца выставляется на технологической оснастке в момент заливки выводов диска компаундом. Сила давления подвижного контакта регулируется за счет подгиба пружины I2.

Зазор между контактами подбирается таким, чтобы дребезг отсутствовал. Для наблюдения дребезга используется специальный стенд, наблюдение ведется по осциллографу. После установления зазора контакт заливается компаундом, реле еще раз проверяется на отсутствие дребезга и ставится на термотренировку. Предварительно вся контактная группа тщательно промывается в спирте В0, обдувается и просушивается.

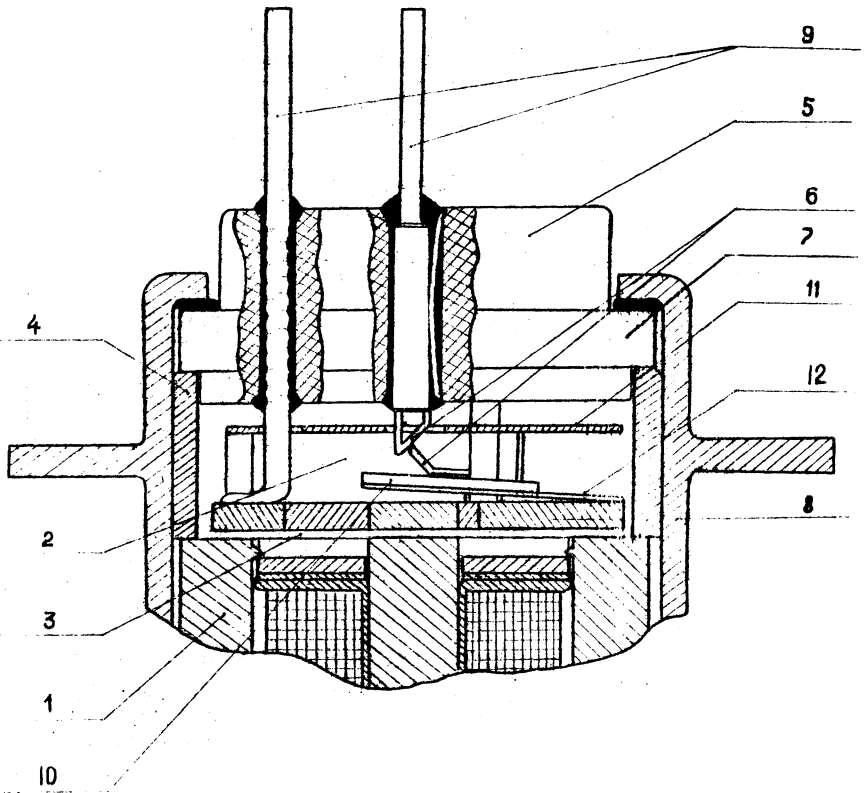


Рис.6. Конструкция реле РВ-3

Для проверки реле по набросу заряда при коммутации применяется специальный стенд, упрощенная схема входной части которого приведена на рис.7. Усилитель переменного тока выполняется по схеме рис.2. На этом же стенде можно измерять паразитные токи изоляторов контактной группы реле.

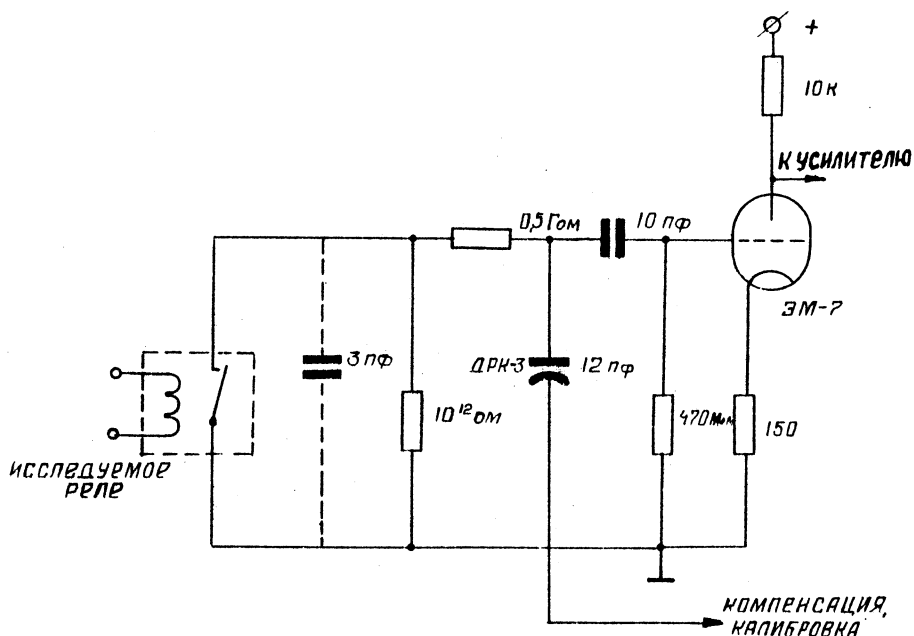


Рис.7. Схема электрометрического блока для измерения наброса заряда в момент замыкания контактов реле

Технические характеристики разработанных реле следующие:

Сопротивление изоляции контактов относительно корпуса и между собой не менее 10^{14} ом. Наброс заряда при переключении контактов для всех реле, кроме РВ-2А, для которого он не нормируется, не более 10^{-15} к. Установившееся значение переходного сопротивления контактов 0,05-0,1 ом. Ток сраба-

тывания 20–30 ма, ток через контакты не более 1ма. Емкость между контактами не более 3 пф (для реле РВ-4 и РВ-4А емкость между одним из контактов и корпусом равна 10 пф). Реле предназначены для работы в диапазоне температур от -50 до +60°С, сохраняют работоспособность после выдерживания в среде с относительной влажностью 98% при температуре +40°С. Реле типа РВ-3 могут работать в условиях механических вибраций.

Накопительные и разделительные конденсаторы. Накопительные конденсаторы используются при измерении малых токов методов накопления заряда. Поэтому паразитный ток накопительного конденсатора должен быть по возможности малым — значительно меньше измеряемого. Сопротивление изоляции конденсатора должно быть как можно большим, чтобы обеспечить наименьшую потерю измеряемого заряда. Чтобы сохранить высокую точность измерений при изменениях окружающей температуры, необходимо иметь малый температурный коэффициент емкости. Аналогичные требования предъявляются и к разделительным конденсаторам, которые используются в схеме преобразователя с динамическим конденсатором на входе усилителя переменного тока.

К настоящему времени разработаны воздушный накопительный конденсатор НК-1 и две модели разделительных конденсаторов: РК-1 с воздушными зазорами и РКМ с твердым диэлектриком между пластинами. На рис.8 показан общий вид конденсаторов НК-1, РК-1 и РКМ.

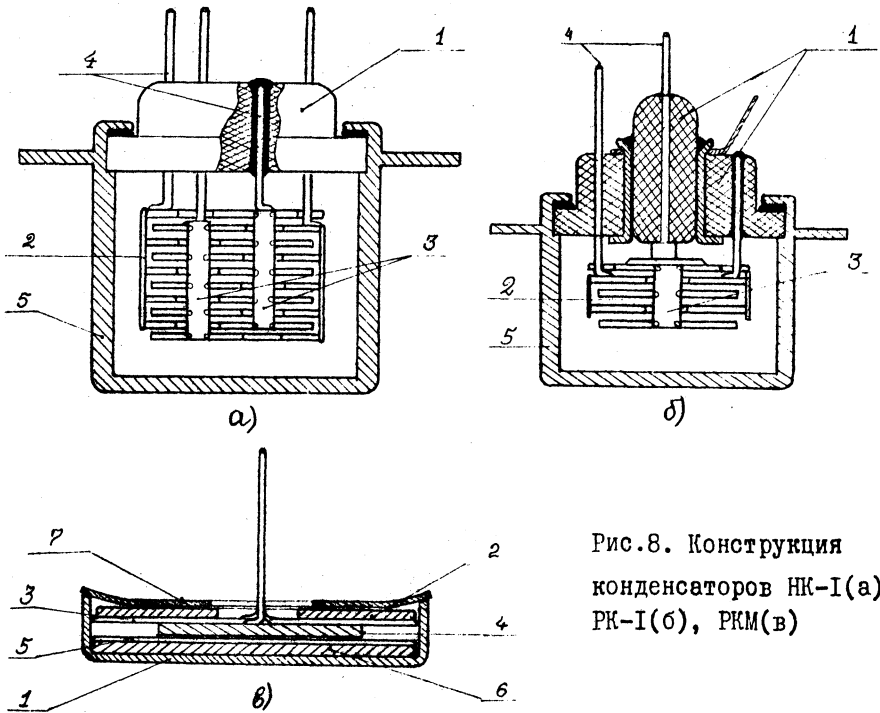


Рис.8. Конструкция конденсаторов НК-1(а), РК-1(б), РКМ(в)

Конструктивно конденсаторы НК-1 и РК-1 подобны. На изоляторе 1 консольно закреплены два блока 2, в каждом блоке пластины между собой сварены микроточечной сваркой. Сварка каждого блока произведена через ленточки 3 в торец пластин. Выводы 4 блоков проходят через изолятор и залиты эпоксидным компаундом. Изолятор с блоками вставлен в корпус 5 и заваляцован.

Основная трудность при данном решении заключается в том, что для уменьшения габаритов конденсатора необходимо уменьшать зазоры между пластинами. Но малые зазоры при на-

личии большого количества пластин довольно тяжело очистить от ворсинок. Наличие хотя бы одной ворсинки, например, от бумаги, может снизить сопротивление изоляции от 10^{15} до 10^{13} Ом.

Преимуществом конденсаторов с воздушными зазорами является то, что они по сравнению с конденсаторами с твердым диэлектриком между пластинами обладают меньшими паразитными токами.

Конденсатор РКМ выполнен в основном из штампованных деталей. В чашечке I уложены три диска (2,4,6), чередующихся с фторопластовыми прокладками 3,5. Один из дисков 4 имеет вывод, а другой диск и фторопластовая прокладка - отверстия, через которые проходит этот вывод. Диски и изоляционные прокладки сжаты пластинчатой пружиной 7, концы которой приварены к краям чашечки I.

Технические характеристики конденсаторов НК-I и РК-I приведены в табл.9 и 10.

Технологические особенности изготовления конденсаторов НК-I и РК-I заключаются в следующем. Все пластины конденсаторов изготавливаются из отожженного сплава 79НМ, каждая пластина полируется на войлочной шайбе с пастой ГОИ до скругления острых кромок и до удаления шероховатостей с поверхности пластин. Затем пластины промываются в бензине, обдуваются воздухом и поступают на сборку. Сначала пластины собираются в специальном приспособлении с дистанционными прокладками, сжимаются и точечной сваркой свариваются поблочно. После сварки такие два блока с дистанционными прокладками вынимаются из приспособления, выводы вставляются в изолятор и заливаются,

как описано выше, эпоксидным компаундом. После отвердения компаунда и термотренировки дистанционные прокладки извлекаются, конденсатор промывается спиртом В0, зазоры между пластинами тщательно очищаются, конденсатор вставляется в корпус, проверяется сопротивление изоляции и емкость, после чего конденсатор завальцовывается.

Описанные выше динамические конденсаторы, реле, накопительные и разделительные конденсаторы применяются в ряде серийно выпускаемых измерительных приборов, таких как МРМ-2 (порог чувствительности по току 10^{-14} а), МРМ-3 (порог чувствительности $5 \cdot 10^{-15}$ а), ВК2-16 (порог чувствительности 10^{-16} а) и других. Опыт серийного изготовления и использования этих элементов показал, что они являются хорошей основой для построения высококачественной электрометрической аппаратуры.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Прокуров А.В., Шуклин К.С. Сб. "Реферативная информация по радиоэлектронике", 1967, № 14, Реф. № 13197.
2. Шуклин К.С. Электродинамический резонансный конденсатор язычкового типа, Авторское свидетельство № 218994, "Бюллетень изобретений", 1968, № 18.
3. Прокуров А.В. "Измерительная техника", 1966, № II, стр. 50-52.
4. Хольм Р. Электрические контакты, М., ИЛ, 1961.

Паразитные токи изоляторов в нормальных условиях (20°C)

Материал	Номер конденсатора	$I_{ср}$ за 5 мин а
Эскапон	0030	$-3,2 \cdot 10^{-17}$
	0035	$+6 \cdot 10^{-17}$
	0024	$-5 \cdot 10^{-17}$
Керамика	I480	$+2,5 \cdot 10^{-16}$
	I5I3	$+1,8 \cdot 10^{-16}$
	0I8I	$+8 \cdot 10^{-17}$
	I278	$+2,4 \cdot 10^{-17}$
Янтарь	0954	$-1,6 \cdot 10^{-17}$
	0724	$-3,2 \cdot 10^{-17}$
	0023	$-4 \cdot 10^{-18}$
	II07	$-3,2 \cdot 10^{-17}$
Фторопласт-4	I088	$+1,6 \cdot 10^{-17}$
		$+1,4 \cdot 10^{-16}$
		$+2,4 \cdot 10^{-16}$

Таблица 2

Паразитные токи изоляторов при температуре +70°C

Материал	Номер конденсатора	I_{cp} за 5 мин а
Эскапон	0030	$-6,2 \cdot 10^{-17}$
	0035	$-6,2 \cdot 10^{-17}$
Керамика	I480	$+4 \cdot 10^{-16}$
	I513	$+4,8 \cdot 10^{-16}$
	I278	$+2 \cdot 10^{-16}$
Янтарь	0954	$+6,2 \cdot 10^{-17}$
		$+8,8 \cdot 10^{-16}$
		$+1,6 \cdot 10^{-17}$
		$+1,8 \cdot 10^{-16}$
Фторопласт-4	0989	$+2,4 \cdot 10^{-16}$
	I248	$+4 \cdot 10^{-16}$
	I078	$+1,6 \cdot 10^{-16}$

Таблица 3

Паразитные токи изоляторов после 48-часового воздействия влаги (98%) при температуре +40°C

Материал	Номер конденсатора	$I_{ср}$ за 5 мин а
Эскапон	0030	$-2 \cdot 10^{-16}$
	0035	$-9 \cdot 10^{-17}$
	0024	$-2,4 \cdot 10^{-16}$
Керамика	1513	$+6 \cdot 10^{-15}$
	0181	$-2 \cdot 10^{-15}$
	1278	$-8 \cdot 10^{-17}$
Янтарь	0954	$-1,4 \cdot 10^{-15}$
	0724	$-16,6 \cdot 10^{-16}$
	0023	$-4 \cdot 10^{-15}$
Фторопласт-4	1078	$+1,6 \cdot 10^{-16}$
	1248	$+3,3 \cdot 10^{-16}$

Таблица 4

Сравнительные характеристики электроизоляционных материалов

Материал	Максимальная скорость натекания зарядов (к/мин)		Сопrotивление изоляции образца объемом 1 см ³ (ом)		Механические характеристики
	при температуре		при температуре		
	20°С	70°С	20°С	70°С	
Эскапон	3,6 · 10 ⁻¹⁵	3,7 · 10 ⁻¹⁵	5 · 10 ¹⁵	1,5 · 10 ¹⁵	Тверд, нехрупок, легко обрабатывается и полируется
		после 5час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С		после 48час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С	
Керамика	1,5 · 10 ⁻¹⁴	1,2 · 10 ⁻¹⁴	1 · 10 ¹⁵	1 · 10 ¹⁶	Механически прочна, но требует специального покрытия поверхности
		после 5час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С		после 48час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С	
Янтарь	1,9 · 10 ⁻¹⁵	5,3 · 10 ⁻¹⁴	5 · 10 ¹⁵	1 · 10 ¹⁶	Хрупок, непрочен
		после 5час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С		после 48час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С	
Фторопласт-4	1,4 · 10 ⁻¹⁴	2,4 · 10 ⁻¹⁴	1 · 10 ¹⁶	5 · 10 ¹⁵	Мягок, обладает холодной текучестью
		после 5час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С		после 48час выдержки в камере влаги (98%) при 40°С	

Таблица 5

Основные технические данные динамических конденсаторов ДРК-2, ДРК-2А и ДРК-3

Параметры конденсатора	Тип конденсатора		
	ДРК-2	ДРК-2А	ДРК-3
Сопротивление изоляции между пластинами (ом), не менее	10^{14}	10^{14}	10^{14}
Контактная разность потенциалов (мв), не более	15	15	15
Остаточная некомпенсируемая ЭДС, приведенная ко входу (мкв), не более	100	80	50
Дрейф за 24 час (мв), не более	2	1	0,25
Дрейф при изменении температуры окружающей среды на 10°C (мв), не более	-	-	0,4
Термоустойчивость ($^{\circ}\text{C}$)	-40+50	-40+50	0+65
Термопрочность ($^{\circ}\text{C}$)	-50+60	-50+60	-
Вибропрочность	1,5 g (5+60) гц	1 g (5+60) гц	-
Влагоустойчивость	-	98% +40 $^{\circ}\text{C}$	65% +20 $^{\circ}\text{C}$

Таблица 6

Основные технические данные динамических конденсаторов ДРК-4

Параметры конденсатора	Тип конденсатора		
	1-й класс	2-й класс	3-й класс
Сопротивление изоляции между пластинами (ом), не менее	10^{15}	10^{14}	10^{14}
Остаточная некомпенсируемая ЭДС, приведенная ко входу (мкв), не более	10	25	50
Ток, генерируемый изолятором (а), не более	10^{-17}	10^{-16}	10^{-15}
Дрейф в течение 24 час после 1 час прогрева (мкв), не более	100	250	600
Вибропрочность	2,5g (5+80)гц	2,5g (5+80)гц	2,5g (5+80)гц
Ударопрочность при многократном ударе	15g	15g	15g
Ударопрочность при одиночном ударе	75g	75g	75g
Термоустойчивость (°C)	-50++65	-40++65	-40++65
Термопрочность (°C)	-50++70	-50++70	-50++70
Влагоустойчивость (%) при температуре +35°C	98	98	98

Таблица 7

Наброс заряда при размыкании контактов
некоторых типов реле

Тип реле	Покрытие контактов	Наброс заряда к
РЭС-10	Серебро + платино- иридиевый сплав	$5,2 \cdot 10^{-13}$
РЭС-10	Серебро + платино- иридиевый сплав	$1,3 \cdot 10^{-13}$
РЭС-10	Серебро + платино- иридиевый сплав	$3,1 \cdot 10^{-13}$
РВ-2А	Серебро	$1 \cdot 10^{-13}$
РВ-2А	Серебро	$3,5 \cdot 10^{-14}$
РВ-2А	Серебро	$4 \cdot 10^{-14}$
РВ-3	Серебро	$1 \cdot 10^{-15}$
РВ-3	Серебро	$2,5 \cdot 10^{-16}$
РВ-3	Серебро	$7 \cdot 10^{-16}$
РВ-3	Платина	$3,1 \cdot 10^{-15}$
РВ-3	Золото	$1 \cdot 10^{-16}$
РВ-3	Золото	$1 \cdot 10^{-16}$

Таблица 8

Зависимость продолжительности дребезга контактов реле РВ-3 от угла соприкосновения и зазора между контактами (мксек)

Угол со- прикосно- вания	40°	45°	50°	54,8°	55°	60°	90°
Зазор (мм)							
0,01	0	0	0	0	0	0	0
0,1-0,2	0	0	0	0	0	-	дребезг большой
0,2-0,3	0	0	-	1500	500	-	-"-
0,3-0,4	0	-	3000	-	-	-	-"-
0,4-0,5	0	-	3000	2000	1000	1000	-"-
0,5-0,6	0	0	-	3000	3000	1500	-"-
0,6-0,7	0	-	3000	-	-	-	-"-
0,7-0,8	закли- нива- ние	0	-	5000	6000	4000	-"-

Примечание: Прочерки означают, что измерения не производились.

Таблица 9

Технические данные накопительных
конденсаторов НК-1

Емкость, пф	$100 \pm 1\%$
Температурный коэффициент емкости, 1/град	$(20+30) \cdot 10^{-6}$
Паразитный ток изолятора, а, не более	$5 \cdot 10^{-17}$
Сопротивление изоляции, ом, не менее	10^{15}
Интервал рабочих температур	$(-50++65)^{\circ}\text{C}$
Габариты, мм	33x26x26
Вес, г	14

Таблица IO

Технические данные разделительных
конденсаторов РК-I

Емкость, пф	10 ± 30
Емкость пластины относительно корпуса, пф, не более	2
Сопротивление изоляции между пластинами, а также между каждой пластиной и корпусом, ом, не менее	10^{15}
Паразитный ток изолятора, а, не более	$5 \cdot 10^{-17}$
Габариты, мм	32x26x26
Вес, г	15,5