УДК 621.316: 621.318.3(035.5)

В.С. Деева, С.П. Ващук, Н.С. Костюков, С.М. Слободян

Устройство герметичного ввода кабельных линий радиочастотных сигналов в условиях вакуума и экстремальных воздействий

Проведён анализ возможностей использования оригинальных разработанных авторами устройств герметичных кабельных вводов для широкого применения в различных областях науки и техники. Описанные в работе герметичные кабельные вводы предназначены для ввода в герметичную защитную оболочку сложных технических объектов радиочастотных и другого типа электрических кабелей без нарушения герметичности защитной оболочки при любых условиях эксплуатации, в том числе и при аварийных ситуациях. В работе проведено обобщение известных подходов создания радиочастотных кабельных вводов. В частности, показаны недостатки применяемых зарубежными фирмами Conax, Oxiprol, Elox и Škoda технических решений герметизации на основе полимерных композиций. Указаны причины и физические явления, обусловливающие неизбежность проявления этих недостатков. Приведён образец разработанной авторами конструкции опытного образца конкретного технического решения, защищённого патентами.

Ключевые слова: герметичный кабельный ввод, керамические изоляторы, вакуум, радиационная стойкость.

Радиочастотные кабели и соответственно присоединительные устройства – устройства ввода–вывода радиочастотных сигналов – находят широкое применение практически во всех областях науки и техники, так или иначе использующих сигналы разных диапазонов спектра волн электромагнитного излучения: в приборостроении, антенной технике, электротехнических, телевизионных радиоэлектронных системах и комплексах, в медицинских приборах и др. [1–13]. Надёжное их функционирование обеспечивает устойчивую работу потребителей: отдельных устройств, систем и в целом радиотехнических и электротехнических комплексов. Кабельные вводы предназначены для герметичного ввода различных типов кабелей в защитную оболочку корпусов радиоаппаратов, комплексов, систем. Передача высокочастотных (ВЧ) сигналов по линиям передачи от источника (генератора ВЧ-сигналов), подключенного через устройство вывода к одному концу линии, к приёмнику ВЧ-сигналов, подключенному через устройство ввода, аналогичное устройству вывода, приборной части приёмника. Кабельные устройства ввода-вывода необходимы для обеспечения связи и информационного взаимодействия между разнесёнными на большие или малые расстояния, частями одной системы или разных систем комплекса. Такое взаимодействие осуществляется с использованием большого числа соединительных конструкций устройств ввода-вывода радиочастотных сигналов. Качество состояния устройств ввода–вывода, эффективности их функционирования, отражаемой коэффициентом передачи, ослабления или потерь ВЧ-сигнала, часто является определяющим для самого факта существования не только элемента ввода-вывода, но и содержащих его структур. Это ведёт к необходимости учёта особенностей искажающих факторов в элементах (разъёмах) ввода-вывода ВЧ-сигналов с целью определения взаимосвязи его параметров и учёта их влияния.

В настоящее время наиболее широко применяется создание герметичных кабельных вводов на основе применения полимерных композиций. К ним можно отнести разработки фирм Conax, Oxiprol, Elox и Škoda с лицензией фирмы Conax [1–11]. Это направление преобладает в мировой практике, но имеет недостатки. В частности, со временем под действием естественной и искусственной радиации в полимерных композициях и материалах идут процессы старения. Их закономерное проявление в условиях эксплуатации приводит к нарастанию внутри полимера механических напряжений, его растрескиванию, и, как следствие, потере герметичности устройств ввода. В пожаре (экстремальная аварийная ситуация) полимерные составляющие при температуре среды выше 300 ^{o}C подвержены возгоранию, что приводит к разгерметизации герметичного ввода и потере его работоспособности.

Поэтому задача обеспечения наименьших потерь (ослабления сигнала) и минимума влияния искажающих факторов в элементах (разъёмах) ввода-вывода ВЧ-сигналов [1–13] является значимой и актуальной. Указанные обстоятельства определяют цель и задачи изложенного ниже анализа.

Цель и задачи анализа. Проблема обеспечения идеальной передачи или приближения к идеалу свойств устройства ввода–вывода для наилучшей связи радиочастотного кабеля линии приёма-передачи сигнала в излагаемой ниже работе решается поиском рационального состава используемых материалов и созданием оптимальной конструкции узла ввода-вывода.

Часто передача ВЧ-сигналов по кабельным линиям питания производится одновременно с передачей по ним напряжения бортовой или промышленной частоты. Поэтому радиочастотные характеристики элемента ввода-вывода должны наилучшим образом соответствовать требованиям к ним как специальным устройствам передачи и присоединения, оптимальным образом передающим токи высокой бортовой промышленной частоты или, другими словами, вносящим наименьшие искажения в процесс передачи.

Присоединение высокочастотных приёмников и передатчиков к линиям питания и связи часто [2–5] осуществляется по схеме сигнал (по жиле) – земля (оплетка) и сигнал–сигнал (по жилам), которые с точки зрения линейного затухания являются на практике примерно равнозначными. Широкое распространение имеет схема «сигнал–земля», во-первых, из-за наименьшей аппаратной сложности и, во-вторых, потому, что позволяет сгруппировать на одной линии большое число каналов ВЧ и питания. К устройствам присоединения относят входной и выходной кабель (линии и приборной части), соединительный элемент ввода-вывода (разъём ввода-вывода), часто ёмкости связи или иногда разделительные фильтры.

В элементе ввода-вывода так или иначе происходит затухание мощности передаваемого сигнала. Затухание сигнала в линии связи [в децибелах (дБ)] определяется как десятичный логарифм отношения мощностей (или амплитуд) колебаний сигнала заданной частоты на входе и выходе линии связи. Так как выходная величина меньше входной, то затухание будет с отрицательным значением. Понятие «затухание» в основном применяют к кабельным линиям связи, а также при измерении ослабления электрических сигналов в проводных, волноводных линиях и других устройствах (аттенюаторах, вентилях). Величина коэффициента затухания зависит от частоты передаваемого сигнала.

Для оценочных расчётов значение a – затухания сигнала, передаваемого узлом ввода-вывода по схеме «сигнал–земля (корпус)» в килогерцовом диапазоне, может быть определено по формуле [2, 3]

$$a^2=10^6\, k\, l f^{1/2} + 2a_\Delta,$$

где l – длина линии передачи, м; f – частота передачи сигнала или напряжения питания, кГц; a_Δ – поправка на концевое затухание в кабеле, принимаемое часто равным 1,3…2 дБ; k – нормирующий коэффициент, примерно равный 6…9 в зависимости от типа линии связи и передачи. Подключение к радиочастотному ВЧ-элементу ввода-вывода осуществляется силовым или контрольным (серии РК) кабелем. РК-кабель имеет медную жилу и оплетку, служащую обратным проводом с защитным покрытием от повреждений [2–5]. Затухание a_Δ (в дБ), вносимое кабелем, в том числе измерительным, при передаче ВЧ-сигнала определяется выражением [2–3]

$$a_\Delta = 1{,}16\cdot 10^{-2} l f^{1/2}\left[\rho_к (D+d)/Dd\right]^{-1},$$

где l – длина кабеля, м; f – частота ВЧ сигнала, кГц; $\rho_к$ – волновое сопротивление кабеля, Ом; D – диаметр внешней оболочки кабеля, мм; d – диаметр жилы кабеля, мм.

Для обеспечения надёжной работы ВЧ-радиочастотного ввода-вывода необходимо, чтобы его параметры и характеристики в различных условиях эксплуатации оставались в заданных пределах паспортной стабильности.

Характеристика ВЧ-канала. Устройство ввода-вывода как канал распространения ВЧ-сигнала или напряжения питания характеризуется заданной частотой, рабочей фазой напряжения сигнала, затуханием ВЧ-тракта передачи и приёма, степенью согласования элементов ВЧ-канала, наличием отражённого сигнала, биением частот на входе узла ввода-вывода.

Достижение наиболее рационального режима работы устройства ввода-вывода взаимосвязанного с передающей и приёмной частью кабеля линии связи и питающего напряжения, достигается согласованием элементов узла ВЧ ввода-вывода для снижения потерь мощности и искажений сигнала или наиболее полного их исключения в требуемых условиях эксплуатации. Герметизация элементов узла ВЧ ввода-вывода это одно из эффективных направлений снижения потерь в точках присоеди-

нения кабелей связи и передачи питающего напряжения. Применение фильтров присоединения – аппаратно более сложный конструктивный путь.

Отражённый сигнал возникает из-за неточного согласования элементов конструкции узла ввода-вывода, при наличии неоднородностей в контактном сопряжении, некачественной герметизации, процесса старения керамики и пластмасс – полимерной изоляции и т.п. Он часть полезной мощности передаваемого по линии связи сигнала, отражаемого от мест неоднородности и возвращаемого на передающий конец линии с некоторым запаздыванием. Запаздывание части сигнала ($\approx 12^{o}$/100 км при скорости распространения ~ $3 \cdot 10^{8}$ м/с) отражённой неоднородностью искажает амплитудную и фазовую характеристику в местах присоединения кабеля к узлам ввода-вывода линий.

Анализ факторов электромагнитной совместимости. Для снижения излучения в местах стыковки и присоединения линий связи как помех постоянных магнитных и электромагнитных полей широкого частотного спектра используют разные способы и схемы пассивного экранирования точек присоединения и стыковки линий. Установка экранирующей оболочки – внешней или внутренней части узла ввода-вывода – может выполняться в непосредственной близости от сигнального провода как внутренний элемент конструкции узла, на который могут воздействовать внешние поля, так и вблизи от внешней, обратного распространения сигнала жилы.

Точность оценки распределения электромагнитного поля узла ввода-вывода, при наличии металлических включений и экранирующих оболочек узла может быть высокой, если использованы обоснованные методы расчёта экранирующих функций многообразия оболочек узла, которые в принципе охватывают множество форм устройств радиометрических ВЧ-герметичных вводов на практике. Разработка оригинальных методов и методик расчёта конструкций и форм оболочек, экранирующих электромагнитное излучение и эффективно снижающих напряжённость полей излучения помех узлом присоединения при изменении передаваемых сигналов в широком их спектре, представляет серьёзные трудности.

При расчёте и оценках распределения экранирующих функций внешних оболочек узла ввода-вывода, как правило, используют фундаментальные основы общей теории электромагнитного поля, базирующейся на уравнениях Максвелла, которые разрешаются для стенки экрана (внешней оболочки узла) и окружающей её среды, а на границе – с помощью соответствующих граничных условий – сопрягаются [4–5]. Для оценки распределения поля внешней оболочки как экрана сложной формы их можно представить в виде набора экранов [5] более простых форм геометрии, оценка экранирующего эффекта которых, в принципе, облегчает расчёт и оценку распределения общего электромагнитного поля внешней оболочки. При этом приходится исследовать физически неосуществимые, но более простые для анализа задачи для оценки уровня напряжённости электромагнитного поля как излучаемых помех, так и проникающих в узел ввода-вывода реальных конструкций с учётом краевых эффектов их форм геометрии.

Для внешних однородных постоянных магнитных и электромагнитных полей оценки распределения поля [4–7] оболочки узла ввода–вывода как экранирующей оболочки конструкции простых геометрических форм были рассчитаны в конце 19-го – начале 20-го века. Работы исследователей по уточнению методов расчёта форм экранирующих оболочек простых форм появляются до сих пор. Практически слабо отражены в печати решения проблем и задач экранирования узлов в неоднородных электромагнитных полях. Распределение излучения электромагнитного поля, структура и вид экранирующих функций зависят в этом случае от расположения источника напряжённости поля излучения и его ориентации в пространстве. Это распределение является функцией пространственных координат.

Для расчёта экранирующих функций оболочек, находящихся [4–7] в неоднородных электромагнитных полях в принципе разработан метод с использованием понятий теории длинных линий [6]. В основу метода положена фундаментальная по теории подобия аналогия физических процессов, описываемых уравнениями распространения электромагнитного диапазона волн через плоскую оболочку бесконечной протяжённости и известными уравнениями длинной линии [4–6]. Этот метод получил широкое распространение, несмотря на «дефекты» сравнительной аналогии. Один из них: применимость этого метода лишь для плоских бесконечных пластин (слоёв, экранов) при нормальном падении электромагнитного поля, когда компоненты электрической и магнитной напряжённости поля взаимно перпендикулярны. Только в этом случае можно использовать скалярное волновое полное сопротивление, а временную фазу определять по направлению вектора Пойтинга. Это одно из положительных свойств такого подхода. Другие: возможность его применения для разного класса

форм экранирующих оболочек, получения при этом аналитических решений, применяемых в инженерной практике, с интерпретируемой наглядностью. В последующей практике его применения исследователями были исключены [7] имевшиеся погрешности применения методики теории длинных линий.

Для решения задач экранирования мешающих и внутренних полей электромагнитного излучения может быть использована и теория цепей как частный случай теории поля. Впервые такой подход использовали Ганн и Герцог [5]. Ожидаемое преимущество применения: возможность построения моделей аналоговых цепей для исследования изменений эффективности экранирования оболочкой точек присоединения линий связи и напряжения питания в широком диапазоне изменения параметров геометрии конструкций узлов ввода-вывода и излучаемых ими электромагнитных полей.

Критерии и методы оценки надёжности узла ввода-вывода. В настоящее время [11–13] необходимость повышения надёжности узлов осуществляется путём совершенствования их конструкций, нахождения или применения наилучших по свойствам материалов для выполнения требуемых условий и задач и правильной оценки надёжности работы узлов в заданных условиях и режимах эксплуатации систем и комплексов. Надёжность функционирования – это выполнение заданных функций в требуемых условиях эксплуатации при заданном технологическом и техническом совершенстве конструкции устройства. Правильная оценка надёжности узлов важна как в эксплуатации, так и при создании самих устройств и проектировании систем и комплексов, в которых устройства ввода-вывода являются обязательными элементами, с точки зрения обеспечения требуемой надёжности этих систем.

В комплексе проявления изменений эмерджентных по Винеру свойств устройства ввода-вывода можно рассматривать как принадлежащие к классу достаточно сложных систем, с учётом воздействия сложности поведения сред, сложных полей и многочастотных сигналов и действующих помех. Это объясняется их многофункциональностью (передача напряжений большой мощности и малых по амплитуде сигналов), восстанавливаемостью, временной избыточностью (наличие длительного ожидания требования), влиянием на эффект передачи через узел ввода-вывода напряжений и ВЧ-сигналов, в разных пространственных точках, разной мощности и природы.

Выполнение заданных узлу ввода-вывода требований и функций может нарушаться. Это и приводит к отказам, которые можно разделить на отказы срабатывания, ненормативные нарушения – при внешних воздействиях и ложные срабатывания – при отсутствии на линии входного сигнала.

Один из подходов оценки надёжности устройств состоит в её оценке как безотказности. Для этого в качестве основного показателя принимается величина $P(t)$ – вероятности безотказной работы устройства на заданном интервале времени t:

$$P(t) = \exp\left(-\lambda_0 t\right),$$

где λ_0 – средняя интенсивность отказов устройства (величина, постоянная на интервале времени оценки). Данный подход учитывает влияние изменений условий функционирования устройства. Но фактически ввиду усреднения (λ_0 – средняя статистическая величина значения интенсивности отказов) нивелирует специфические особенности проявления отказов (полный, частичный и восстанавливаемый), а также их действие на вероятность безотказного функционирования. С другой стороны, понятие надёжности устройств указывает на то, что величина вероятности безотказности явно зависима от изменения конкретных условий функционирования аппаратуры.

Это можно учесть, определяя показатель результирующей надёжности, используя величину среднего значения ΔP – снижения качества (потери эффективности) функционирования узла при наличии отказов и нормализуя её на величину P_0 – предельной теоретически ожидаемой эффективности этого устройства. Для оценки надёжности в этом случае получим соотношение $P_{\text{Н}}(t) = \Delta P_0 / P_0$. Тогда ненадёжность устройства определяется суммой значений ненадёжности устройств при внутренних и внешних воздействиях, в различных режимах и условиях функционирования, учитываемых весовыми коэффициентами [11, 12]. Величина ненадёжности определится просто: $R = 1 - P_{\text{Н}}$.

Результат практической разработки. Выбор материалов и элементов конструкции герметичных кабельных вводов определяет техническое задание на решение конкретной задачи. Требования для описываемого в статье устройства, заключались в том, что изделие должно было обладать по-

вышенной радиационной стойкостью при γ-излучении (интегральная доза радиации в эксплуатации $5 \cdot 10^8$ рад), состоять из негорючих материалов, обладающих химической устойчивостью при высоких температурах (стандартный пожар до 990 °С), и выдерживать воздействие дезактивирующих растворов и тропические условия.

Наиболее широко используемым типом являются вводы многочастотных и контрольных кабелей типа ВГКК. Их конструкция основана на изобретениях [8–10] и приведена ниже на рис. 1. Особенность созданного устройства герметичного ввода – выполнение из негорючих, огнестойких и стойких к радиации неорганических материалов и металлов. Использование проводников – отрезков кабелей с минеральной изоляцией и металлической оболочкой – позволяет выполнить требования. Даже разгерметизация соединения жилы кабеля с металлическим модулем не приводит к разгерметизации всего устройства, так как наличие оболочки кабеля позволяет герметично соединить его с фланцами корпуса, а минеральная изоляция служит адсорбирующим фильтром радиоактивных загрязнений.

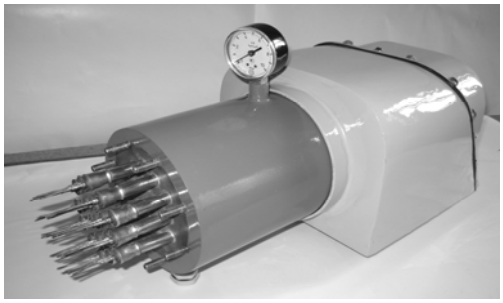

Рис. 1. Устройство герметичного ввода радиочастотных кабелей типа ВГКК

Практическая конструкция устройства содержит металлический корпус, герметизированный с обеих сторон фланцами. Внутри корпуса расположен элемент биологической защиты. С торцов корпус закрывается кожухами, предназначенными для защиты узлов герметизации от механических и тепловых воздействий. Через внутренний элемент типа шайбы–фланца пропущены изолированные электрические проводники – отрезки кабеля с жаростойкой минеральной изоляцией в металлической оболочке. В качестве их могут быть использованы кабели типа КМЖ с металлической оболочкой и магнезиальной изоляцией. Отрезки кабеля пропущены в охваченные металлической оболочкой отверстия фланцев и припаяны или приварены к ним. Концы отрезка очищены от изоляции и с обеих сторон герметизированы внутри пространства защитного кожуха с помощью металлокерамического модуля с выходной жилой. Для контроля герметичности ввод имеет штуцер. После монтажа кабели и элементы узла ввода-вывода проверяются на целостность жилы и правильность подключения её и оболочки к соответствующим элементам узла. Сопротивление изоляции измеряется относительно земли (корпуса) мегаомметром на 1000 В ($R_{из} \geq 10$ МОм) и испытывается изоляция мегаомметром на 2500 В в течение 1 мин (рис. 2).

Герметичный ввод-вывод радиочастотных кабелей сделан с применением технологии пайки в вакуумной печи. Конструкция герметичного ввода радиочастотных кабелей защищена патентами [8–10]. Она имеет высокую надежность за счет применения металлокерамических модульных компонентов, значительно повышающих пороговый уровень радиационной и пожарной стойкости устройства. Приведённое на рис. 1 устройство герметичного ввода радиочастотных кабелей испытано и принято Межведомственной комиссией. Утверждены технические условия, разработка передана в производство.

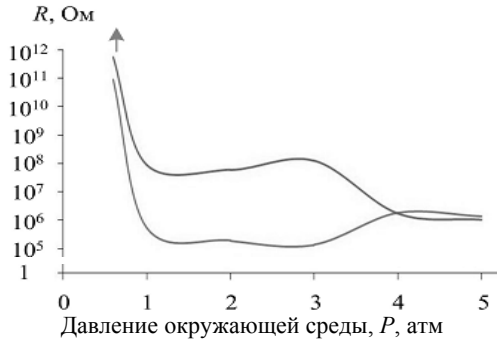

Рис. 2. Изменение сопротивления изоляции между элементами–проводниками при изменении давления окружающей среды: (нижняя кривая – жила–оплетка; верхняя – жила–жила); при давлении более 4 атм обе зависимости сходятся в пределах погрешности измерений

Заключение. Разработанная конструкция устройства радиочастотного герметичного кабельного ввода, состоящая только из металлокерамических материалов и кабелей с соответствующей изоляцией, обладает повышенной степенью надежности при экстремальном воздействии множества факторов окружающей и аварийной среды. Показано, что кроме высокой стойкости к действию радиации (гамма-излучению) выбранные для изготовления ввода материалы существенно повысили огнестойкость (до 1000 °С) герметичного кабельного ввода как отдельного самостоятельного устройства.

Литература

1. Костюков Н.С. Герметичные кабельные вводы для АЭС / Н.С. Костюков, С.П. Ващук, Г.И. Пакулов, С.Д. Холодный // Атомная энергия. – 1993. – Т. 75, № 6. – С. 25–29.
2. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
3. Никулин Н.В. Радиоматериалы и радиокомпоненты / Н.В. Никулин, А.С. Назаров. – М.: Высшая школа, 1986. – 208 с.
4. Апполонский С.М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
5. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 328 с.
6. Schelkoff S.A. Electromagnetic waves. – New York – Toronto – London: D. van Nostrand Company, 1948. – P. 188–241.
7. Schulz R.B. Shielding in practical design for electromagnetic compatibility / R.F. Fiechi, ed. – New York: Hayden, 1971. – P. 69–92.
8. А.с. 1833022 СССР, МКИ^2 H01B17/26. Герметичный ввод / Костюков Н.С., Павлов Д.В., Антонова Н.П., Цуркан Л.М., Ващук С.П. – № 4485949/07; заявл. 03.10.88. опубл. 30.09.90. Бюл. № 6. – 2 с.
9. Пат. 2030001 РФ, МПК H01B17/26. Герметичный ввод / Холодный С.Д., Костюков Н.С., Ващук С.П., Данилюк В.И. – № 4859223/07; заявл. 20.08.90; опубл. 27.05.95. Бюл. № 6. – 4 с.
10. Пат. 2030049 РФ, МПК H01B17/26. Герметичный ввод экранированных кабелей / Костюков Н.С., Ващук С.П., Берковский Е.Я., Щеглова М.Д., Антонова Н.П. – №4835121/07; заявл. 27.05.95. Бюл.. № 6. – 2 с.
11. Деева В.С. Устойчивость энтропийной оценки живучести систем / В.С. Деева, С.А. Романишина, С.М. Слободян // Изв. Том. политех. ун-та. – 2013. – Т. 322, № 2. – С. 67–72.
12. Деева В.С. Энтропийный подход к оценке живучести средств контроля / В.С. Деева, С.М. Слободян // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2015. – № 4(126). – С. 121–128.
13. Матвеевский В.Р. Надежность технических средств управления. – М.: МГИЭМ, 1993. – 92 с.

Деева Вера Степановна
Канд. техн. наук, доцент Института природных ресурсов Томского политехнического университета
Тел.: 8 (382-2) 30-31-33
Эл. почта: veradee@mail.ru

Ващук Сергей Петрович
Канд. техн. наук, доцент Амурского государственного университета
Тел.: 8 (416-2) 50-22-87
Эл. почта: amurgermovvod@mail.ru

Костюков Николай Сергеевич
Д-р техн. наук, профессор Амурского государственного университета
Тел.: 8 (416-2) 50-22-87
Эл. почта: amurgermovvod@mail.ru

Слободян Степан Михайлович
Д-р техн. наук, профессор Института природных ресурсов Томского политехнического университета
Тел.: 8-952-886-72-24
Эл. почта: sms_46@ngs.ru

Deeva V.S., Vaschuk S.P., Koctyukov N.S., Slobodyan S.M.

Device of sealed cable input of radio-frequency signals in vacuum and under extreme effects

The paper gives the analysis of the possibilities of using the original devices of sealed cable input for a wide application in various fields of science and technology. These devices are developed by the authors. They are for use in complex technical objects of radio frequency (RF) and other electrical cable without opening the containment under any operating conditions, including emergencies. In this paper the generalization of the known approaches to RF cable input creating is given. In particular, the shortcomings of technical sealing solutions based on polymer compositions used by Conax, Oxiprol, Elox and Škoda are shown in the paper. The causes and the physical phenomena causing these shortcomings are shown. The prototype developed by the authors is covered by patents.

Keywords: sealed cable input, ceramic insulators, glass insulators, vacuum technology, action radiation.