

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ РЯДА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

THE RESULTS OF STUDIES OF THE INFLUENCE OF A NUMBER OF THERMODYNAMIC PARAMETERS ON THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS DURING LEAKAGE CONTROL

С. А. Бушин / vnii4@vnii.ru

S.A. Bushin

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова», г. Москва,

Представлены результаты исследований о влиянии ряда термодинамических параметров на точность измерения степени негерметичности газонаполненных разрядников при высокочувствительном контроле герметичности на установке УФКГ¹. При косвенном методе измерения погрешность искомой величины утечки обуславливается неопределенностями, из которых доминирующими являются значения стандартных отклонений давления пробного (рабочего) газа и объема полости, в которой он заключен.

The results of studies of the influence of a number of thermodynamic parameters on the measurement accuracy of the degree of leakage of gas-filled arresters at highly sensitive leakage control at the UFKG installation are presented. With an indirect measurement method, error of the desired value leakage value is determined by the uncertainties, of which dominant are the standard deviations of the pressure of the test (working) gas and the volume of the cavity in which it is enclosed.

Ключевые слова: контроль герметичности, высокочувствительные испытания, степень негерметичности, поток утечки, косвенные измерения, погрешность, относительное среднеквадратическое отклонение, объем, давление газа, температура.

Key words: leakage control, highly sensitive tests, degree of leakage, leakage flow, indirect measurements, error, relative standard deviation, volume, gas pressure, temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных характеристик любой электрофизической установки, являются метрологические характеристики, представляющие собой информацию о свойствах измерительных приборов и факторов, влияющих на результаты измерений и их точность. В частности, при контроле герметичности в зависимости от погрешности проводимых испытаний на нижнем пределе оценка свойства герметизируемого объекта – считать последний годным, либо отнести его к числу забракованных? – является вопросом весьма неоднозначным для принятия правильного решения при отсутствии сведений о допуске отклонения от заданной нормы герметичности.

Требования достижения единства и высокой точности измерений при течеискании в настоящее время приобретают все большую актуальность и распространенность. При этом разрабатываемые методики и специальные технические средства для реализации высокочувствительных испытаний, основанные на масс-спектрометрическом методе, вызывают особый интерес [2-4]. Главным образом, это обусловлено необходимостью

¹Автоматизированная масс-спектрометрическая установка финишного контроля герметичности миниатюрных газонаполненных разрядников [1]

идентификации течей с величинами близкими по значению к чувствительности вышеуказанного метода. Однако имеется ряд проблем, связанных с достоверностью оценок результатов испытаний на герметичность при масс-спектрометрическом контроле. Во многом это вызвано неопределенностями измерений термодинамических параметров, используемых при косвенных измерениях величины степени негерметичности, характеризуемой суммарным расходом воздуха (пробного/рабочего газа), поступающего через течи в единицу времени при нормальных условиях. В связи с этим, при решении задачи по определению допустимых отклонений от номинального значения потока натекания, устанавливаемого практически для любых герметизируемых объектов, будь это элемент, устройство или вакуумная система, во внимание принимаются именно такие параметры как объем V , температура T и давление газа P [5].

В настоящей работе представлено детальное рассмотрение вышеуказанных параметров на примере проведенных исследований метрологических характеристик для промышленного образца масс-спектрометрической автоматизированной установки финишного контроля герметичности газонаполненных разрядников [1,6].

ПРИНЦИП МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

В основе метода по определению степени негерметичности газонаполненных разрядников [7] на установке УФКГ лежит метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации ионов пробного (рабочего) газа, проникающего через сквозные дефекты контролируемого объекта. На базе данного метода применен способ накопления, при котором идентифицируемый газ (неон), истекающий из исследуемого разрядника в некоторый герметизированный объем, перепускается через заданный интервал времени в измерительный объем, где регистрирующей системой производится его обнаружение, фиксация и количественная оценка.

Степень негерметичности определяется по разности нарастающих сигналов масс-спектрометра, а именно: минимального, установившегося после перепуска накопленного газа, и фонового, отнесенных на момент начала перепуска путем экстраполяции линеаризированной методом наименьших квадратов прямой, характеризующий полезный сигнал, относительно построенной линии регрессии, относящейся к фону.

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ.

ВОЛЮМОМЕТРИЧЕСКИЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПАРАМЕТРЫ

Как уже было отмечено, при определении степени негерметичности в числе параметров, необходимых для получения количественной оценки потока утечки из изделия требуется располагать информацией о величине объема. При этом необходимо располагать значениями вместимости, как самого объекта контроля, так и объема измерительной системы, где непосредственно проводятся измерения.

Для определения величин объемов вакуумной системы установки финишного контроля использовался экспансионный (объемный) метод, основанный на законе Бойля-Мариотта. В качестве калиброванного объема использовался порционный объем $V_{\text{МК}}$ (микрообъем), величина которого определялась весовым методом; значение микрообъема составило $0.635 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, а значение ее относительного среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma_0(V_{\text{МК}})$ не превысило 1.14 %.

Определение объемов измерительной системы основывалось на способе, заключающемся в последовательной цепочке проводимых экспансионных циклов перепуска исходной порции газа из одного объема в другой. При приготовлении порций в контрольном объеме $V_{\text{МК}}$ использовались два манометрических преобразователя абсолютного действия 1) *MKS “Baratron” 690A* ($\pm 2 \%$), (MKS Instruments, США) и 2) *BVD-5* ($\pm 3-5 \%$), (ФГУП НИИВТ им. С.А. Векшинского, Россия).

Суммарное стандартное отклонение $\sigma_0(V_{\Sigma})$ объединенного объема измерительной системы из четырех составляющих была оценена в 45.5 % при расчетной вместимости

$2.691 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Полученное значение погрешности можно считать за ошибку со сравнительно большой величиной неприемлемой для расчетов, в связи с высокими требованиями, предъявляемыми к оценке измеряемой степени негерметичности с заданным значением $\pm 15 \%$. Поэтому для ее снижения требовалось изменить методический подход в определении величин объемов.

Следует отметить, что трудности, связанные с появлением сравнительно больших погрешностей, возникают, как правило, при определении объемов, входящих в состав сложных полиблочных вакуумных систем, состоящих из n -го количества объемов. Особенно проблемными в практическом аспекте являются измерения, проводимые со свободными объемами у конструкций с относительно малыми вместимостями, примыкающими к объемам, которые могут быть больше по величине на несколько десятичных порядков.

В виду невозможности применения известных технических решений определения вместимостей объемов для рассматриваемой конфигурации вакуумной системы установки возникла необходимость в разработке нового методического подхода при измерениях.

Сущность предложенного технического решения [8] состоит в том, что для исключения влияния погрешности измерения давления в исходной порции, а также задействованных вспомогательных объемов, потребовалось кроме создания порции в контрольном объеме создавать аналогичную порцию в измеряемом объеме с тем же показателем давления, что и у порции в контрольном объеме $V_{\text{МК}}$, с последующим расширением в объединенный объем, величина которого остается неизменной после каждого расширения.

Надо отметить, что характерной особенностью нового решения является то, что в нем учтены побочные явления, связанные с адсорбционно-десорбционными процессами, проявление которых наиболее выражено в системах в условиях высокого вакуума, а также с возможностью возникновения теплового эффекта (явление тепловой эффузии), связанного с изменением температуры при перепусках, когда истечение газа не является квазистатическим изотермическим процессом. Установлено, что различия в значениях температур стенок объемов вакуумной системы перед прямым и обратным перепусками на 1 К приводит к возникновению относительной погрешности в 0.3% .

На основе данных, полученных по результатам испытаний, среднее (из восьми камер) значение объема камеры накопления $V_{\text{КН}}$ оценено в $1.279 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, при этом величина СКО $\sigma_0(V_{\text{КН}})$ составила 2.1% . Значение оценки величины вместимости суммарного объема, включающего вспомогательные объемы описанным выше способом, составило – $V_{\Sigma} = 2.5969 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, а его стандартное отклонение – $\sigma_0(V_{\Sigma}) = 2.516 \%$.

Полученные значения стандартных отклонений объемов в отличие от ранее установленных можно считать приемлемыми, поскольку их точность измерений находится приблизительно на том же высоком уровне точности измерения порционного микрообъема $V_{\text{МК}}$, используемого для определения искомых значений вместимостей.

ПАРАМЕТР, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ПАРЦИАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ (ИОННЫЙ ТОК)

Квадрупольные масс-спектрометры, широко используемые в настоящее время в вакуумных исследованиях, а также для контроля герметичности и, в частности, на установке УФКГ (*QMG220*), относятся к классу приборов для качественного анализа. Тем не менее, было бы оправданным попытаться провести необходимый метрологический анализ с тем, чтобы использовать его в оценке возможности применения данного прибора в качестве измерительного средства, тем более что, согласно ГОСТ 15624-75 (взамен ГОСТ 15624-70) [9], масс-спектрометр является измерительным прибором (см. кодификатор групп средств измерений МИ2614-2006; код группы – 3133601) [10].

Для получения достоверной оценки результатов количественного анализа при использовании газоаналитического метода необходимо выполнение определенных условий (предположений). К ним относятся: 1) стабильность отношений линий в масс-спектрах каждого вещества; 2) постоянство чувствительности масс-спектрометра; 3)

линейная суперпозиция линий различных компонентов; 4) пропорциональная зависимость между интенсивностью и парциальным давлением компонентов.

Следует отметить, что все эти предположения удовлетворяются только с некоторыми допущениями. Так, например, стабильность отношения линий в спектрах зависит во многом от стабильности режима работы источника. При этом, как было показано в работах [11-13], количество и относительная величина пиков индивидуальных газов для большинства масс-анализаторов практически неизменны в диапазоне энергий ионизирующих электронов 70-130 эВ. Обозначенный диапазон энергий для масс-спектрометра данного типа является базовым.

К числу параметров, ответственных за стабильность относятся также спектро-аналитические коэффициенты, а именно: коэффициент переноса ионов, коэффициент использования пробы и производительность, которые, в конечном счете, могут быть объединены воедино в коэффициент передачи датчика анализатора [14]. В этой связи существенным фактором стабильности для масс-спектрометра является постоянство последнего.

Выражение для коэффициента передачи датчика квадрупольного масс-спектрометра K_{oi} [15] описывается следующей зависимостью:

$$K_{oi} = S_i \cdot \eta_i \cdot K_i, \quad (1)$$

где S_i – эффективность ионного источника; η_i – трансмиссия масс-спектрометра; K_i – коэффициент усиления по току.

Эффективность ионного источника, как было показано в работе [16], прямо пропорциональна максимальному давлению анализируемого газа, выходной апертуре ионного источника, ускоряющему напряжению и относительному коэффициенту ионизации α_i , при этом обратная пропорциональность присуща величине длины стержня электрода, а также верхней границе диапазона анализируемых масс. Согласно имеющимся данным [17], эффективность ионного источника имеет порядок ≈ 10 ионов/электрон мм рт.ст.. Из числа всех обозначенных параметров, главным образом, безразмерный относительный коэффициент ионизации можно выделить как наиболее «уязвимый» в плане предельных характеристик разброса. Однако, если проводить некоторую аналогию между коэффициентом ионизации и пиковой воспроизводимостью отношений амплитуд азота по отношению к воздуху при постоянных условиях (в течение 8 часов) согласно паспортным данным на масс-спектрометр, то эта приведенная величина в среднем составляет $\pm 0.5\%$. При этом все остальные имеют также относительно жесткие предельные отклонения и приблизительно одинаковые по величине.

Коэффициент трансмиссии при относительно высокой разрешающей способности в диапазоне масс – 1-45 а.е.м. также стабилен, поскольку возможные погрешности напрямую зависят только от линейных размеров апертуры источника и расстояния между электродами, которые в свою очередь регламентированы.

С целью повышения пороговой чувствительности, а также снижения постоянной времени квадрупольный фильтр масс снабжен вторично-электронным множителем (ВЭУ). Значение коэффициента усиления ВЭУ при $U_{вэу} \leq 3500$ В составляет по оценкам значение $1 \cdot 10^8$. Как известно существенным недостатком всех конструкций ВЭУ является нестабильность коэффициента усиления [18], особенно снижение его после контакта с атмосферой. Коэффициент усиления характеризует среднее число электронов на аноде ВЭУ (последний диод) при попадании одного иона на его катод (первый диод). Поскольку вторичная ионно- и электронно-электронная эмиссия носят статистический характер, то ожидаемая частота выбивания вторичных электронов ($p=0, 1, 2...$) при соударении с поверхностью отдельного иона или электрона описывается распределением Пуассона [19]. Поэтому величина коэффициента усиления для каждого отдельного иона флуктуирует около среднего значения.

Проведенный метрологический анализ показал, что погрешность коэффициента передачи масс-спектрометра в значительной степени зависит от стабильности

коэффициента вторичной эмиссии и коэффициента ионизации различных веществ в азотном (аргоновом) эквиваленте. При этом полученная оценка среднего квадратичного отклонения $\sigma_0^2(K_{oi})$ составляет $\pm 3.2\%$.

Кроме коэффициента передачи существенную роль играет реализация усилительной части масс-спектрометра. Одним из требований, предъявляемых к газоанализаторам, является увеличение минимальной доли i -го компонента, которую можно обнаружить при максимальном рабочем давлении в объеме, то есть речь идет об увеличении динамического диапазона. Поставляемый измерительный электронный модуль – IO220 газоанализатора, выполненный на основе интегрированной платы включает в состав своих электронно-технических устройств логарифмический усилитель, который перекрывает динамический диапазон изменения ионного тока из шести декад и полностью отвечает методическим требованиям проведения процесса записи масс-спектров в реальных условиях.

На рис. 1 представлены графики зависимостей изменения СКО $\sigma_0(U_{\text{вых}})$, вносимых логарифмическим усилителем с учетом погрешности, от функции, описываемой линией аппроксимации «а», и суммарного стандартного отклонения результата измерения уже с учетом отклонений коэффициента передачи масс-спектрометра «б».

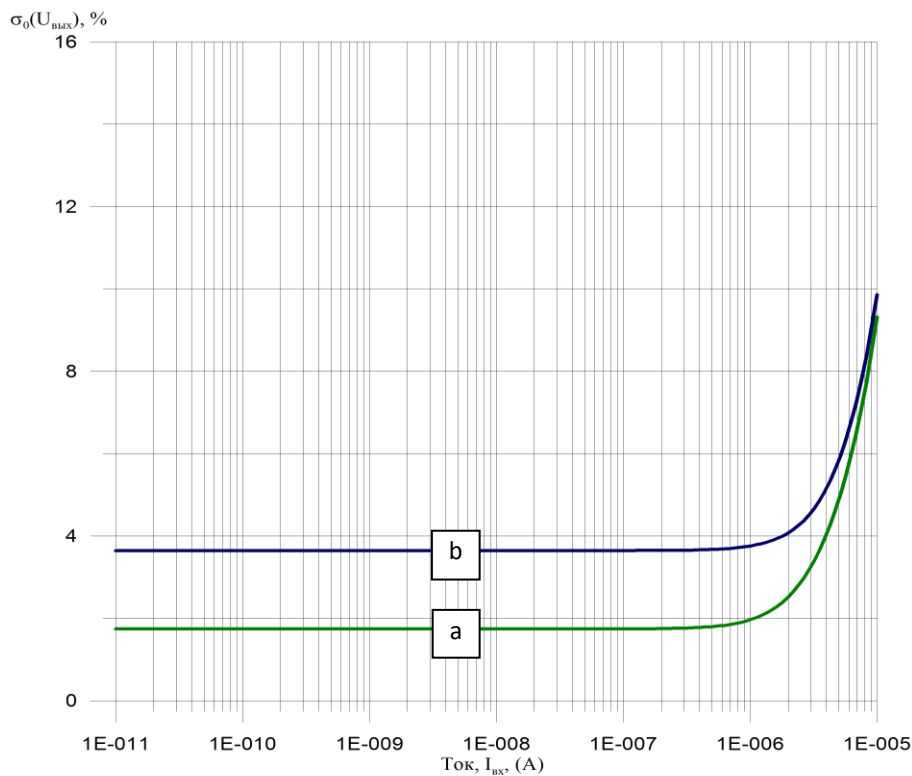


Рис.1. Зависимость $\sigma_0(U_{\text{вых}})$ от входного ионного тока $I_{\text{вх}}$.

Теоретический анализ предельных значений погрешности выходного сигнала с массовым числом 20 М/е (главная линия в спектре неона – рабочего газа в полости контролируемого разрядника) показывает, что в диапазоне токовых значений $1 \cdot 10^{-11}$ – $7 \cdot 10^{-7}$ А величина ошибки постоянна и находится на уровне 1.75 % ($4,5369 \cdot 10^{-4}$). При этом в области от $7 \cdot 10^{-7}$ А до $3.8 \cdot 10^{-6}$ А погрешность по экспоненте растет до 3.9 %, а в пределе от $3.8 \cdot 10^{-6}$ А до $1 \cdot 10^{-5}$ А – до 9.4 %. Проведенные исследования характеристик рассеивания типовых масс-спектров с массовым числом 20 М/е в диапазоне от $1.6 \cdot 10^{-11}$ А до $1 \cdot 10^{-6}$ А имеют схожий разброс: от 4 % до 0.93 %.

В процессе работы на УФКГ экспериментально получены данные о средней квадратической погрешности случайной составляющей коэффициента чувствительности

масс-спектрометра по контрольному газу; погрешность составила $\pm 7.396 \%$, что также подтверждает правомерность подхода о наличии постоянства в значениях чувствительности масс-спектрометра.

Таким образом, можно сделать следующее предположение, что данный масс-спектрометр в виду стабильности его основных метрологических характеристик и сравнительно высоких точностных показателей фактически допустимо рассматривать в качестве измерительного средства.

ОЦЕНКА ОСНОВНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА УТЕЧКИ В ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ РАЗРЯДНИКАХ

Степень негерметичности (поток утечки Q_n) разрядника определяется выражением:

$$Q_n = \frac{(I - I_0) \cdot V_{\Sigma}}{S \cdot t_n}, \quad (2)$$

где I_0, I – амплитуда пика газоанализатора на 20-м М/е соответственно перед перепуском и после перепуска порции газа в объединенный объем измерительной системы из камеры накопления, [А]; S – коэффициент абсолютной чувствительности измерительной системы, [А/Па]; V_{Σ} – суммарный объем измерительной системы и камеры накопления, [м³]; t_n – время накопления, [с].

На основании общей формулы (2) можно записать соответствующее выражение для относительной дисперсии потока Q_n :

$$\frac{D(Q_n)}{Q_n^2} = \frac{1}{n} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot \frac{I}{I_0}}{\left(\frac{I}{I_0} - 1\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{D(I)}{I^2} + \frac{D(V_{\Sigma})}{V_{\Sigma}^2} + \frac{D(S)}{S^2} + \frac{D(t_n)}{t_n^2} \right]. \quad (3)$$

Как отмечалось ранее, дисперсия измерения интенсивности пика на молекулярном 20 М/е определяется случайной составляющей и для расчетов оставлена без изменения – $4.5369 \cdot 10^{-4}$; соотношение I/I_0 использовалось со значением 2.1 [среднее (2,5-1,7)]. Погрешность измерения суммарного объема измерительной системы и камеры накопления с размещенным в нем прибором V_{Σ} в виде относительной дисперсии составляет – $6.333 \cdot 10^{-4}$. Методически установлено, что процесс контроля динамики изменения полезного сигнала протекает в течение 90...120 с, что составляет 178..236 точек-отсчетов (n); для расчетов число измерений n выбиралось равным 178 точкам.

Расчетное значение относительной дисперсии коэффициента абсолютной чувствительности масс-спектрометра $\frac{D(S)}{S^2}$ соответствует значению $5.471 \cdot 10^{-3}$.

Относительная дисперсия измерения времени накопления t_n обусловлена при автоматической обработке особенностями аппаратных реализаций прерываний операционной системы WINDOWS относительно запроса и установки текущего времени. Отсчет времени идет примерно 64 раза в секунду, что равносильно затрачиванию 15.6 мс на каждый отсчет. Отсюда, используя закон равномерного распределения для погрешности времени накопления с учетом максимально допустимой экспозиции в 30 мин и пренебрегая последними двумя составляющими из-за их малости, получим:

$$\frac{D(\Delta t)}{\Delta t^2} = \frac{1}{1.645^2} \cdot \frac{|\Delta t|^2}{\Delta t^2} = (1.1 - 2.6) \cdot 10^{-7},$$

следовательно, $\sigma_0(\Delta t) < 0.1 \%$.

Таким образом, результирующая СКО степени негерметичности [20] оценивается значением $\sigma_0(Q_n) = 7.8\%$ и не превышает заданное значение погрешности измерения степени негерметичности в 15 %.

ВЫВОДЫ

Величина степени негерметичности на основе метода косвенных измерений непосредственно выводится из исходных параметров, являющихся результатами прямых измерений физических величин – объема, давления, температуры и величины меры длительности – времени. При этом для оценивания неопределенности измерения итогового результата используются неопределенности, оцененные для каждого отдельного термодинамического параметра, а также периода времени натекания (накопления).

В количественном аспекте невысокая точность результатов измерений потока утечки (натекания) может быть обусловлена в основном доминирующими погрешностями от двух параметров – изолированных от откачки объема камеры накопления с контролируемым объектом совместно с объемом измерительной системы, в которой заключен датчик масс-анализатора, и давления контролируемой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 101072 РФ, МКПО 10-05. Автоматизированная установка финишного контроля герметичности / Смирнов Г А, Хапов А С, Козловская Т И, Бушин С А, Черных Е В, Баканов А П, Галкин С С; заяв. и патентооблад. Гос. корпор. по атом. энерг. Росатом; ФГУП Всерос. науч.-исслед. ин-т автоматики им. Н. Л. Духова. – № 20015502993; заявл. 24.08.15; опубл. 16.12.16.
2. Chen X, Xiao L, Huang T, Shu Y, Chen P and Cha L 2006 J. Vac. Real time calibration for ultrasensitive leak detection 81 257.
3. Reich G 1987 J. Vac. Leak detection with tracer gases; sensitivity and relevant limiting factors 37 n.8/9 691.
4. Hidalgo J M and Segovia de J L 2006 J. Vac. 2008 Leak calibration by comparison with reference standard leaks 82 1151.
5. Бэр Г Д 1977 Техническая термодинамика (Москва:Мир) с 519.
6. Bushin S A, Kozlovskaya T I 2017 Proc. 15th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT2017) Automated equipment for final leak tightness inspection of miniature gas-filled instruments. 13-17 november, Singapore.
7. Бушин С А 2012 Вакуум. техн. и технол. Методика высокочувствительного контроля герметичности газонаполненных разрядников по истечению неона т.22, №2 с 98.
8. Пат. 2680159 РФ, МПК G 01F 1/00; G 01F 17/00; G 01L 27/00; G 01L 23/00. Способ определения объемов замкнутых полостей / Бушин С А; заяв. и патентооблад. Гос. Корпор. по атом. энерг. Росатом; ФГУП Всерос. науч.-исслед. ин-т автоматики им. Н. Л. Духова. – № 2018103223; заявл. 29.01.18; опубл. 18.02.19. Бюл. № 5. с 27.
9. ГОСТ 15624-75 Масс-спектрометры. Термины и определения. – Введ. 1987–01–01. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.
10. МИ2614-2006 Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Кодификатор групп средств измерений – Введ. 2006-05-19. – Москва: ФГУП ВНИИМС, 2006. – 202 с.
11. Рафаэльсон А Э и Шерешевский А М 1968 Масс-спектрометрические приборы (Москва:Атомиздат) с.235
12. Гуревич Л С, Розанов Л Н и Саксаганский Г Л 1971 Электронная техника. Сер. Приемно-усилительные лампы К вопросу о количественном анализе смесей в вакуумных системах с помощью масс-спектрометров **вып.1(18) 29**
13. Шумиловский Н Н, Стаховский Р И 1966 Масс-спектральные методы (Москва-Ленинград: Энергия) с 160

14. Ehlert T C 1970 J. Phys Determination of transmission characteristics in mass filters 3 E3 237
15. Слободенюк Г И 1974 Квадрупольные масс-спектрометры (Москва: Атомиздат) с 272.
16. Huber W K and Rettinghaus G 1979 J. Vac. Sci. and Technol Validity of mass spectrometric measurements at pressures excedring 10^{-4} mbar **16**, №2 681
17. Аверина А П 1962 ПТЭ Омегатрон как измеритель парциальных давлений в высоковакуумных системах №3 123
18. Blanchord W R et al. 1986 J. Vac. Sci. and Technol Long-term chauges in the sen sitivity of quadrupole mass spektrometers A4 **3**, Pt **2** 1715
19. Сысоев А А и Чупахин М С 1977 Введение в масс-спектрометрию (Москва:Атомиздат) 304
20. Бушин С А и Галкин С С 2017 Вакуумная техника и технология Источники погрешностей при измерениях степени негерметичности на установке УФКГ т. **27**, №4 1–5.

АКТИВНАЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ACTIVE VIBRATION ISOLATION OF HIGH VACUUM EQUIPMENT

В.П.Михайлов / mikhailov@bmstu.ru

А.А.Копылов / wertyoz@bk.ru

А.В.Казаков / kazalexander@mail.ru

Д.К.Товмаченко / svarog4@mail.ru

V. P. Mikhailov, A. A. Kopylov, A.V. Kazakov, D. K. Tovmachenko

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г.Москва

Дано описание устройства и принципа работы активной виброизолирующей платформы на основе магнитореологического (МР) эластомера для высоковакуумного оборудования. Представлены результаты экспериментальных исследований привода платформы в режиме активной виброизоляции и определен коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

A description of the device and the principle of operation of an active vibration-isolating platform based on magnetorheological (MR) elastomer for high vacuum equipment are given. The results of experimental studies of the platform drive in the active vibration isolation mode are presented and the transmission coefficient of the vibration displacement amplitude is determined.

Ключевые слова: платформа для активной виброизоляции, высокоточный привод, высоковакуумное оборудование, магнитореологический эластомер, замкнутая система управления, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

Key words: platform for active vibration isolation, high-precision drive, high vacuum equipment, magnetorheological elastomer, closed-loop control system, transmission coefficient of vibration displacement amplitude.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии исследования и производства микро- и наноструктур (наноплёнок, объёмных структур), обладают широким набором методик исследования