

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов Л.Н. 1990, *Вакуумная техника: Учеб. Для вузов по спец. «Вакуумная техника».* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. – 320 с.: ил.
2. 2009, *Вакуумная техника: справочник/ К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова.* 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 590 с., ил.
3. <https://www.mksinst.com/n/residual-gas-analysis>
4. <https://webbook.nist.gov/chemistry/mw-ser/>

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СВВ МЕХАНИЗМОВ

### UHV MECHANISM DIAGNOSTICS SYSTEM

Р.О.Емельяненко<sup>1</sup> / novator90@yandex.ru, Д.В.Копытов<sup>1</sup> / dima.sds@mail.ru.,  
Е.А.Деулин<sup>2</sup> / deulin@bmstu.ru

**R.O.Emelianenko, D.V.Kopytov, E.A.Deulin**

<sup>1</sup>ООО Ю Эйч Вакуум

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э Баумана,

*Разработанная в МГТУ система диагностики вакуумных механизмов позволяет заблаговременно предсказывать отказы. Зная регрессионную зависимость вероятности отказа от значения контролируемого параметра, мы составляем вероятностный прогноз остаточного ресурса работы механизма. В качестве информационного сигнала могут использоваться колебания давления в вакуумной камере, и этот метод удобно использовать в высоко- и сверхвысоковакуумном оборудовании, когда информационный сигнал не подавляется шумовыми сигналами.*

*The system for diagnostics of vacuum mechanisms developed at MSTU makes it possible to predict failures in advance. Knowing the regression dependence of the probability of failure on the value of the controlled parameter, we make a probabilistic forecast of the residual life of the mechanism. Pressure fluctuations in a vacuum chamber can be used as an information signal, and this method is convenient to use in high- and ultra-high-vacuum equipment, when the information signal is not suppressed by noise signals*

*Ключевые слова: диагностика отказов, трение, пьезонатекатель, частотный анализ, СВВ механизмы, газовыделение, физика трения*

*Keywords: failure diagnostics, friction, piezoelectric valve, frequency analysis, UHV mechanisms, outgassing, physics of friction*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует целое семейство методов диагностики механизмов, использующие в качестве информационного источника различные параметры. К ним относятся вибродиагностика, акустическая диагностика, диагностика по тепловому потоку, по моменту сопротивления вращению и др., но применение этих методов в вакуумной технике невозможно из-за сложности и герметичности конструкции, а, с другой стороны, вакуумные механизмы обычно работают с малыми скоростями и при малых нагрузках, так что выше перечисленные информационные сигналы о приближающемся

разрушении становятся заметными только тогда, когда разрушение уже произошло. Используемый в машиностроении метод плано-предупредительного ремонта (ППР) не позволяет полностью избежать аварийных отказов, поскольку остается  $\gamma$ -процентная вероятность возникновения отказа, и выходом из трудностей может послужить система диагностики, которая собирает информацию о реальном состоянии механизма и дает прогноз на будущее о его работоспособности. В этом случае аварийные ремонты удалось бы перевести в разряд предупредительных и тем самым сократить ущерб от потери ценных материалов и рабочего времени. Основой такой системы являются: 1- информация о текущих параметрах диагностируемых вакуумных механизмов, 2- знание физико-технических законов потери работоспособности механическими элементами. В качестве контролируемых параметров могут выступать: степень вакуума, поток газовой выделений, уровень вибрации механизмов, температура нагрева элементов механизмов, величина собственных сил сопротивления механизма, и др.

### МЕТОД ДИАГНОСТИКИ

Представленный ниже метод относится к системе ранней диагностики отказов механических элементов вакуумного оборудования [1], которая основана на частотном анализе потока газовой выделений. Однако при использовании частотного анализа мы сталкиваемся с трудностью обнаружения потоков газовой выделений в рабочей камере из различных элементов механизма, что объясняется несколькими факторами: 1. Слишком малые потоки газовой выделений из механизмов заметны лишь в СВВ; 2. Явление уменьшения амплитуды и изменение формы сигнала потока вследствие откачки; 3. Влияние характеристик средств измерения давления и оцифровки сигнала; 4. Колебания базового давления в вакуумной камере.

Реальный Пример случайного суммирования сигналов потоков газовой выделений из работающих в вакууме механизмов приведён на рис. 1, где сложность расшифровки сигнала рабочего давления в вакуумной камере понятна. На самом деле эта связь сложна тем, что сигнал «момент сопротивления» является косвенным показателем процесса трения в вакууме, а основной причиной колебания давления являются всплески потоков газовой выделений из элементов механизмов, циклически вступающих в процесс трения, при этом колебания сигнала «момент сопротивления» отражает лишь силовую картину взаимодействия элементов вакуумного механизма..

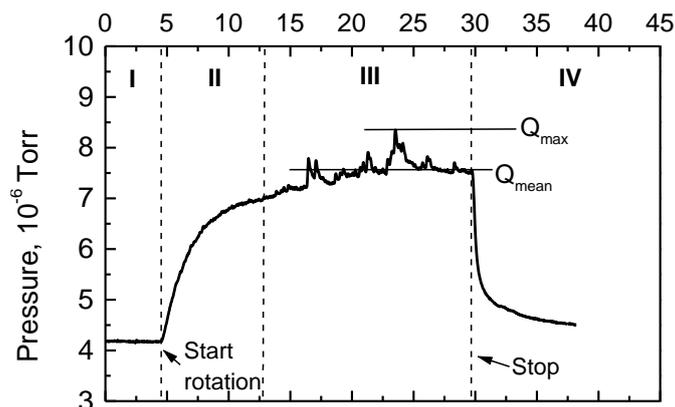


Рис. 1. Диаграмма изменения рабочего давления в вакуумной камере как функция процесса «пуска – остановки» работающего вакуумного механизма.

Трудность применения частотного анализа для расшифровки сигнала давления в вакуумной камере связана с трудностью выделения спектров потоков газовой выделений из различных элементов механизма, что заметно лишь в сверхвысоком вакууме (СВВ). Это объясняется несколькими факторами:

1. Имеет место явление «смазывания» сигнала т.е. явление уменьшения амплитуды и изменения формы сигнала давления под влиянием одновременно работающих в вакууме элементов [2]

2. Влияние объёма камеры и процесса откачки на форму сигнала давления [3]

3. Влияние характеристики вакуумметров-средств измерения вакуума.

Решение задачи диагностирования «вакуумного» сигнала возможно в том случае, если у создателей системы диагностики есть инструмент, позволяющий точно генерировать импульсы потока газов, поступающего в вакуумную камеру, где измеряется рабочее давление. Решение описанной задачи моделирования процесса газовой выделенной из механизмов с переменными циклическими или случайными параметрами потока решается нами с помощью пьезо-нагревателя, позволяющего электронными методами решать задачу заданного регулирования параметров потоков поступающего в вакуумную камеру в широком диапазоне частот и амплитуд импульсов. Используемый авторами пьезокерамический нагреватель, способен генерировать и регулировать импульсы потока нагревающего газа в диапазоне частот до  $10^4$  Гц (с амплитудой до  $10^2$  м<sup>3</sup>Па/с).

Задачами создания системы вакуумной диагностики является использование диаграмм изменения давления, получаемого в вакуумной установке, насыщенной механизмами для определения частот газовых потоков, генерируемых механизмами и для оценки состояния механизмов.

На рис.2 мы видим упрощённые примеры влияния параметров вакуумной системы на получаемый в этой системе сигнал давления Р (от исходного сигнала потока нагревающего газа Q. Для изучения влияния средств измерения и оцифровки сигнала на обнаружение сигнала потока из элемента механизма было учтено, что чувствительность АЦП определяется его разрядностью т.е. максимально возможной цифрой в двоичном коде, а также то, что для каждого поддиапазона вакуумметра эта величина будет разной. Например при давлении в вакуумной камере  $2 \cdot 10^{-5}$  Па (диапазон  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  Па) и дополнительным изменением давления от механизма вакуумметра ВИМ-2, величина дискретности составляет:

$$\Delta = \frac{10^{-4}}{2^{12}} = \frac{10^{-4}}{4096} = 2,44 \cdot 10^{-8} \text{ , Па} \quad (1)$$

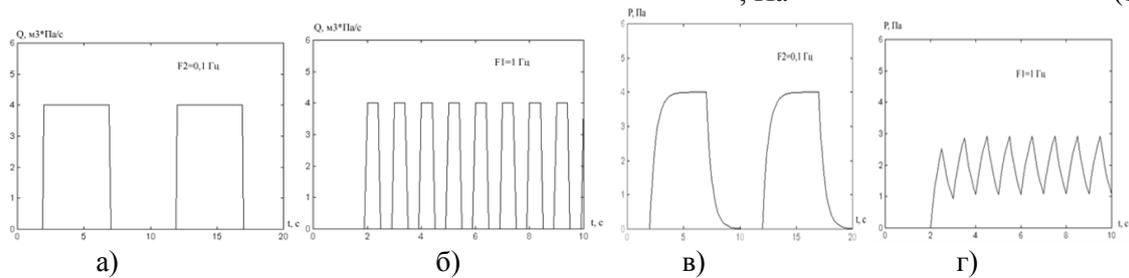


Рис. 2. Примеры исследуемых сигналов: а) Исходный сигнал при частоте F1=1 Гц, б) Исходный сигнал при частоте F2=0,1 Гц, в) Полученный сигнал при частоте F1=1 Гц, г) Полученный сигнал при частоте F2=0,1 Гц.

На верхней диаграмме рис. 3 показан генерируемый входной синусоидальный сигнал Q с частотами от 1 до F=0,05 Гц имитирующими поток из кинематического элемента вакуумного механизма и измеряемый на выходе системы выходной сигнал давления Р являющийся сигналом отклика на входное воздействие. Как видно из представленных кривых амплитуда сигнала потока при увеличении частоты в 5 раз (средняя кривая) и в 20 раз (низ) не уменьшается, также как и форма сигнала, в то время как амплитуда сигнала давления от исходного значения 2 усл. ед. уменьшается до значений 0,5 и 0,1 усл. ед.

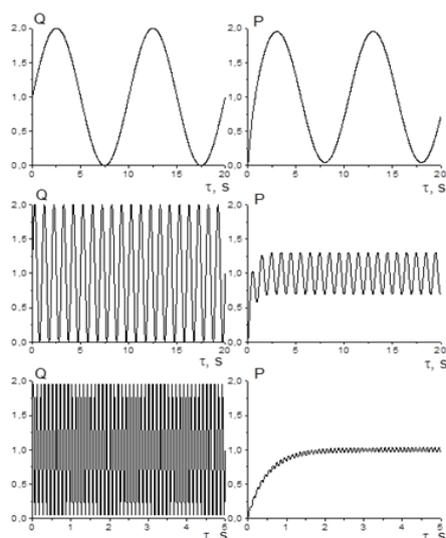


Рис.3. Вид входных синусоидальных сигналов Q с частотами F= 1, 0,2, 0,05 Гц имитирующими поток из вакуумного механизма и измеряемых на выходе системы выходных сигналов давления P.

Сложность применения частотного анализа для расшифровки сигнала потока в вакуумной камере связана с трудностью выделения спектров потоков газовой выделения из различных элементов механизма, заметны лишь в сверхвысоком вакууме (СВВ). Это объясняется несколькими факторами: 1. имеет место явление «смазывания» сигнала; 2. характеристики вакуумметров и цифровых приборов давления и др. Рассмотрим подробнее влияние первого фактора, для чего рассмотрим влияние параметров  $S_0$  (быстрота откачки) и  $V$  (объем вакуумной камеры) системы на характер изменения давления внутри вакуумной камеры. Поток газовой выделения  $Q$  из работающего вакуумного механизма поступает в вакуумную камеру объемом  $V$ , которая откачивается высоковакуумным насосом со скоростью  $S_0$ . Результирующее давление  $P$  в вакуумной камере измеряется с помощью вакуумметра. Поскольку уравнение газового баланса в вакуумной камере описывается формулой:

$$Q = pS_0 + V(dp/dt) \quad (2)$$

$Q$  - суммарный поток в вакуумной камере;  $P$  - давление в вакуумной камере;  $V$  - объем вакуумной камеры;  $S_0$  - скорость откачки;

Мы преобразуем его в уравнение аperiodического звена

$$T(dx_2/dt) + x_2 = kx_1 \quad (3)$$

Где:  $x_1$  - входное воздействие на систему;  $x_2$  - выходной сигнал (отклик) системы;  $T$  - постоянная времени системы;  $K$  - коэффициент усиления системы.

Для вакуумной системы входным воздействием будет поток газовой выделения из элемента механизма  $Q$ , а выходным сигналом (откликом системы на входное воздействие) - давление  $P$  в вакуумной камере. Разделив обе части уравнения газового баланса (2) на  $S_0$  получим коэффициенты уравнения:  $T = V/S_0$  - постоянная времени вакуумной системы,  $K = 1/S_0$  - коэффициент усиления вакуумной системы. Амплитудно-частотная характеристика аperiodического звена определяется с помощью формулы

$$H(\omega) = 1/(T^2\omega^2 + 1)^{1/2} \quad (4)$$

где  $\omega$  - частота.

Построенная по этой формуле зависимость отношения амплитуд входного сигнала  $A_{вх}$  (потока  $Q$ ) и выходного сигнала  $A_{вых}$  (давления  $P$ ) от частоты для параметров  $S_0=1$ ,  $V=0,5$  и амплитуды сигнала равной двум условным единицам показана на рис.4. В системе диагностики выходного используется программа, реализованная в среде

программирования Mat Lab основанная на коррелограммном варианте Фурье анализа [3,4]. С другой стороны сигнала давления может иметь различную форму, значительно отличающуюся от синусоидальной, поэтому уровень распознаваемого программой сигнала может быть различным. Из теории управления [1] известно, что передаточная функция апериодического звена, каким является рассматриваемая нами вакуумная система имеет вид

$$W=K/(TS+1) \quad (5)$$

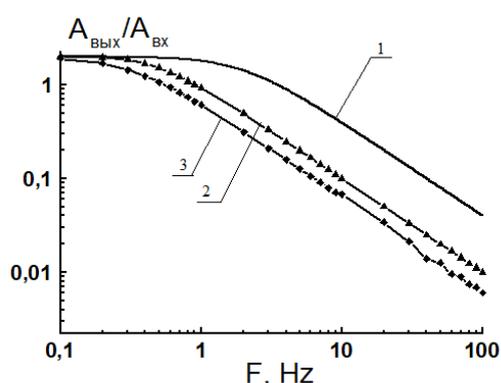


Рис.4 Амплитудно-частотные характеристики изменения амплитуды колебания давления в откачиваемой вакуумной камере, рассматриваемой как апериодическое звено:  $A_{Вх}$  - амплитуда входного сигнала (потока  $Q$ ),  $A_{Вых}$  - амплитуда выходного сигнала (давления  $P$ ); 1 - расчетная АЧХ; 2 - АЧХ при сигнале потока  $Q$  в форме меандра; 3 - АЧХ при сигнале потока  $Q$ .

Таким образом, рассматриваемая нами структурная схема моделирует влияние параметров вакуумной системы на проходящий через неё исследуемый сигнал потока газа. Работами [2,3,4] показано сигнал газовыделения из элементов вакуумного механизма носит пульсирующий характер. Из теории газообмена [4,5] известно также, что процесс механически стимулированной десорбции происходит при выходе поверхностей из контакта, поэтому, для системы диагностики важно учитывать, что выделение газа из пар трения происходит в такт процессу контактирования поверхностей вакуумных механизмов, и поэтому, для моделирования потоков газовыделения из работающих кинематических пар вакуумных механизмов наиболее близким сигналом является сигнал в форме меандра.

## ВЫВОДЫ

Представлен метод оценки кинетических параметров газовыделения в виде экспоненциальных пиков по измеренной зависимости давления в вакуумной камере от времени. Разработан универсальный критерий  $Z$ , позволяющий моделировать периодические негармонические импульсы газовыделения различной формы в зависимости от параметров процесса газовыделения. Экспериментально получены зависимости изменения амплитуды давления от пульсирующего потока газовыделения при различных частотах пульсации потока и при заданных параметрах  $V$  и  $S_0$  вакуумной системы. Полученные зависимости амплитуды спектра от частоты при известных параметрах  $V$  и  $S_0$  вакуумной системы можно использовать в качестве поправочных коэффициентов при расчёте исходных потоков газовыделения из исследуемых механизмов. Определены области значений параметров вакуумной системы и процесса газовыделения, позволяющие определить заранее заданную форму импульса, что представляет большой практический интерес для исследования потоков газовыделения из

пар трения и механизмов, а также для других видов динамического прерывистого газовыделения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами - М.: Изд-во МГТУ, 1993. - 492с., ил
2. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms/ Deulin E.A., Michailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. / Springer edition.- 2012, 234pp.
- 3 Коновалов П.И., Меньшиков И.П., Невшупа Р.А. Студенческий вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 49-53.
4. Nevshupa R.A., J.L. de Segovia, Peresadko A.G., Deulin E.A. Vacuum **69** (2003) pp. 477-487.
5. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ.- М.: Мир, 1990.-584 с., ил