

6. Пономарев Д.В. Исследование процессов термомеханического взаимодействия титановых и алюминиевых сплавов при диффузионной сварке / Диссер. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук, ДК04.200.02080, Курск, 2008.
7. Каракозов Э.С., Харламов Б.А., Равич А.М. и др. Механизм образования соединения между сплавом АМц и корундовой керамикой при диффузионной сварке//Сварочное производство, №12, 1987. - с. 33-36.
8. Тажибаева И.Л., Чихрай Е.В. Численное моделирование диффузии газов в твердых телах при облучении. Методическое пособие для студентов. Алматы, 1999. - с.78.
9. Бушин С.А., Каменев В.Г., Халькина Е.С., Галкин С.С. Прикладное программное обеспечение для установки финишного контроля герметичности разрядников //Вакуумная техника и технология, т. 25 (вып.2), Санкт-Петербург, 2015. - с.77-82.
10. Каталог фирмы “Adixen Vacuum Products by Pfeiffer Vacuum”, Франция.

## **Динамические характеристики вакуумной системы для диагностики отказов механизмов**

*Е.А. Деулин, В.П. Михайлов, Р.О. Емельяненко  
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская, д. 5  
E-mail: deulin@bmstu.ru, mikhailov@bmstu.ru*

*В работе приведена оценка динамических характеристик средств откачки и измерения давления вакуумной системы для диагностики отказов механизмов (времени выхода на заданное давление при воздействии быстропеременных потоков). Определены регистрируемые частоты действия прямоугольных импульсов газового потока из пар трения при диагностике состояния механизма и прогнозировании времени отказа.*

***Dynamic characteristics of the vacuum system for the mechanisms failure diagnosis.**  
**E.A.Deulin, V.P.Mikhailov, R.O. Emelianenko.** The dynamic characteristics of pumping and pressure measurement of the vacuum system for the mechanisms failure diagnosis (time of output to a given pressure under the influence of fast-changing flows) are evaluated. The frequency of the rectangular pulses of the gas flow of friction pairs is determined by the diagnosis of the mechanism and predicting the time of failure.*

Метод диагностики отказов механических элементов вакуумного оборудования [1], основан на частотном анализе потока газовой выделения из пар трения механизма и трудности расшифровки получаемых сигналов. Это объясняется несколькими факторами: потоки газовой выделения из механизмов малы и заметны лишь в сверхвысоком вакууме; происходит уменьшение амплитуды и изменение формы измеряемого потока газовой выделения из-за процесса откачки; характеристики средств измерения и оцифровки сигнала давления влияют на точность измерения; колебание базового давления в вакуумной камере влияет на результаты измерения.

Схема вакуумной системы для диагностики отказов механизмов представлена на рис. 1. Система содержит диагностируемый механизм 1, вакуумную камеру 2, вакуумный насос 3, пьезонатекатель 4, вакуумметр термодатный 5, вакуумметр ионизационный 6 и термодатный 7, вакуумметр ионизационный 8.

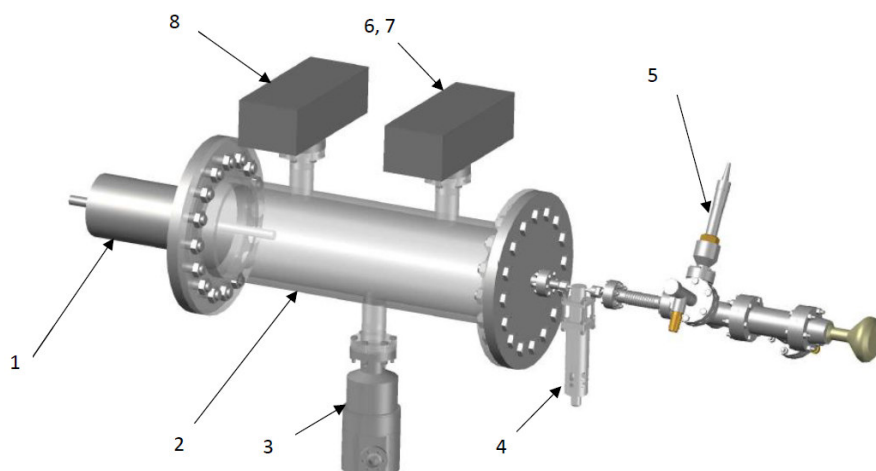


Рис.1. Схема вакуумной системы для диагностики отказов механизмов.

В качестве примера диагностируемого механизма рассмотрим сифонный ввод вращения, схема которого показана на рис. 2. Ввод содержит входной эксцентриковый вал 1, корпус 2, сифон 3, первый, второй и третий вакуумные шарикоподшипники 4,5,6, выходной эксцентриковый вал 7. При вращении выходного эксцентрикового вала 7 из узлов трения – первого, второго и третьего вакуумных шарикоподшипников выделяются газовые потоки  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  газа, имитирующие импульсы газовыделения из механизма с частотой до  $10^4$  Гц и амплитудой газового потока до  $10^2$  м<sup>3</sup>Па/с.

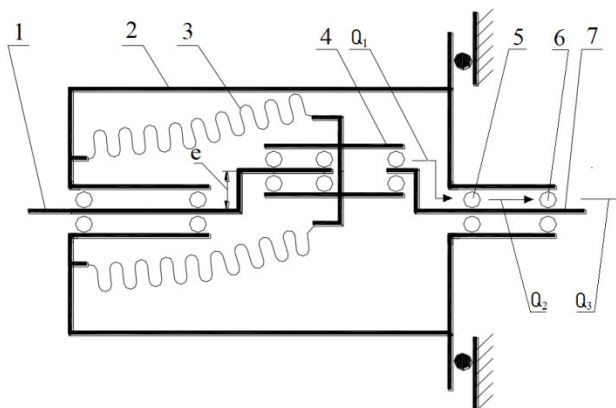


Рис.2. Схема сифонного ввода вращения.

Пример суммирования сигналов потоков газовыделения из работающего в вакууме механизма и случайного проявления всплесков суммарного давления  $P$  как функции времени приведён на рис.3, где наглядно видна сложность расшифровки сигнала рабочего давления в вакуумной камере, реагирующего на моменты пуска (start) и остановки (stop). Связь этого сигнала с исходным сигналом частоты вращения шарикоподшипника требует использования научных методов, показанных ниже.

На рис.4. показан типовой график изменения потока газовыделения из пар трения вакуумных механизмов для разных условий работы (разных контактных напряжений  $\sigma_k$  и скоростей скольжения  $V_{ск}$ ). Большое газовыделение в начальный период объясняется приработкой пар трения и удалением с трущихся поверхностей сорбата. Следующий период является периодом установившейся работы, когда устанавливаются стационарный температурный режим и постоянная скорость изнашивания покрытия поверхностей трения. После износа покрытия начинается взаимодействие «чистых» поверхностей, насыщенных водородом, сопровождающееся возрастанием коэффициента трения и температуры. Эти

явления являются следствием изменения фрикционного взаимодействия и появления когезионного взаимодействия. В период появления когезионного трения, являющегося показателем катастрофического износа, резко возрастает не только поток газовой выделения за счет повышения температуры в контакте, но и изменяется состав выделяющихся газов, так как с поверхности металла начинает выделяться водород, растворенный в приповерхностном слое. Увеличение контактных напряжений  $\sigma_k$  и скоростей скольжения  $V_{ск}$  в парах трения оказывает слабое влияние на число циклов работы механизма, но приводит к значительному росту потока газовой выделения.

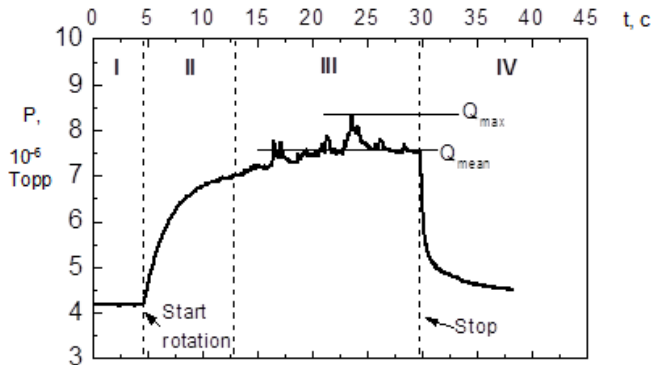


Рис.3. Рабочее давление в вакуумной камере как функция процесса «start-stop» (пуска–остановки) работы механизма, использующего шарикоподшипники.

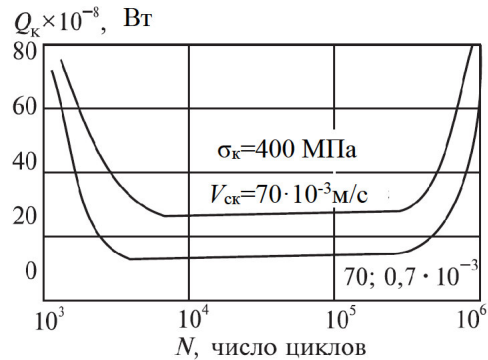
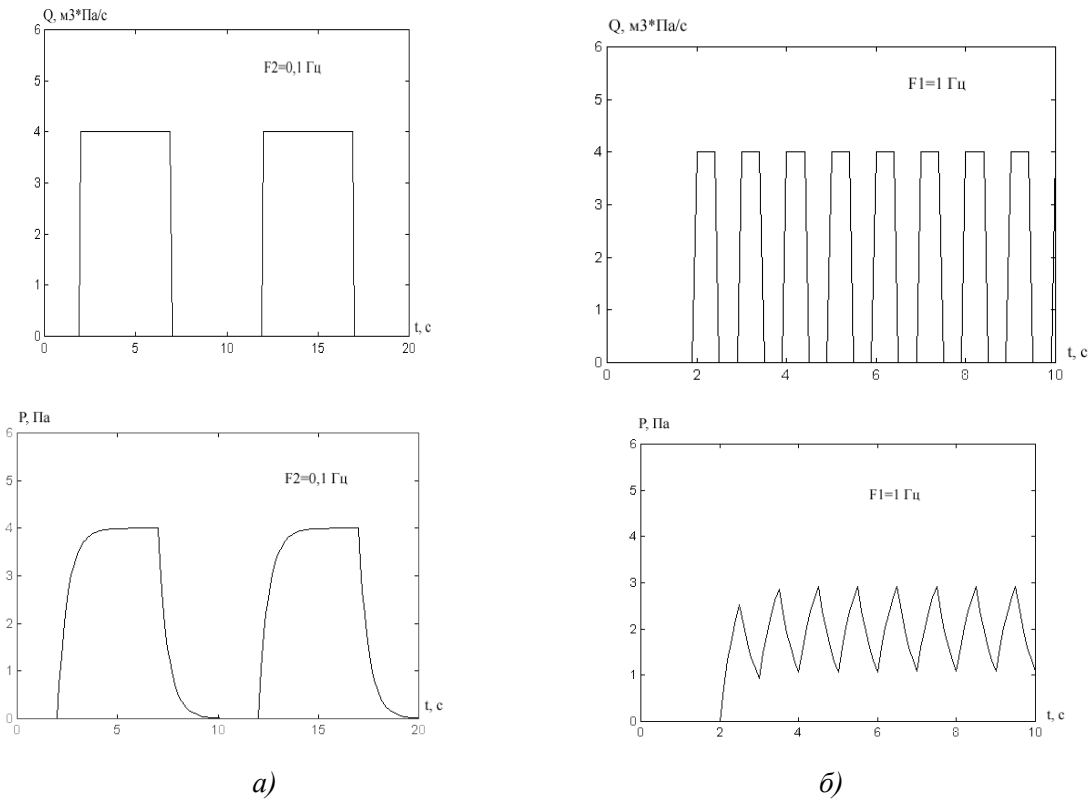


Рис.4. Изменение потока газовой выделения из пар трения вакуумных механизмов.

Практическая задача диагностирования вакуумного сигнала заключается в теоретическом восстановлении амплитуды и формы исходного сигнала газовой выделения, знание которых позволяет ставить диагноз «состоянию здоровья» диагностируемого механизма. Инструментом, удобным для «восстановления» исходного сигнала газового потока, выделяющегося из вакуумного механизма, является прецизионный импульсный вакуумный пьезонатекатель 4 (рис. 1), преимуществом которого является способность создавать импульсные малые потоки газа, имитирующие импульсы газовой выделения из механизма с частотой до  $10^4$  Гц и амплитудой газового потока до  $10^2$  м<sup>3</sup>Па/с.

Рассмотрим пример решения задачи создания модели диагностики с помощью пьезонатекателя 4 (рис. 1). В нашем примере мы полагаем, что пьезонатекатель 4 имитирует пульсирующий поток газовой выделения из вакуумного механизма: зубчатого зацепления, шарикоподшипника или др. Верхние графики на рис. 5. представляют сигналы газового потока, получаемого в вакуумной камере от импульсов, генерируемых пьезонатекателем при разных частотах, нижние графики показывают изменения давления в вакуумной камере. Сопоставление диаграмм изменения давления, получаемых при напуске потоков газа, генерируемых пьезонатекателем, показывает возможность решения задачи, стоящей при создании системы диагностики. Для развития способов решения задачи рассмотрим график на рис. 5, где показаны входные и выходные сигналы при изменении частоты входного сигнала газового потока, от 0,1 до 1 Гц, при скорости откачки  $0,05$  м<sup>3</sup>/с и объеме вакуумной камеры  $0,04$  м<sup>3</sup>.



*Рис.5. Примеры напускаемых потоков  $Q$  и исследуемых сигналов давления  $P$ : а) диаграммы при частоте исходного сигнала  $F_1=0,1$  Гц, б) при частоте исходного сигнала  $F_2=1$  Гц.*

Сложность применения частотного анализа для расшифровки сигнала потока в вакуумной камере связана с трудностью выделения спектров потоков газовыделения из различных элементов механизма. Это объясняется тем, что имеет место «смазывание сигнала» – уменьшение амплитуды сигнала давления под влиянием объёма камеры и быстроты откачки.

Проведем динамическое моделирование и рассмотрим функциональную схему вакуумной системы диагностики отказов механизмов (рис. 6) на примере диагностики отказов сильфонного ввода вращения, схема которого показана на рис. 2. При вращении входного вала на величину  $X$  (рис. 6) потоки газовыделения  $Q_1, Q_2, Q_3$  из узлов трения – шарикоподшипников 1, 2, 3 суммируются и составляют поток  $Q$  из вакуумного механизма 4. Этот поток поступает в вакуумную камеру 5 объёмом  $V$ , которая откачивается со скоростью  $S_0$ . В результате в вакуумной камере увеличивается давление  $P$ , которое регистрируется при помощи ионизационного манометра 6, преобразующего давление  $P$  в величину ионного тока  $I$ . Сигнал ионного тока  $I$  подается на аналого-цифровой преобразователь 7, преобразуется в цифровую форму напряжения  $U$  и анализируется в управляющем компьютере 8.

Уравнение газового баланса в камере 2 (рис. 1) описывается уравнением [2]:

$$Q = PS_0 + V \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

где  $Q$  - суммарный поток в вакуумной камере;  $P$  - давление в вакуумной камере;  $V$  - объём вакуумной камеры;  $S_0$  - скорость откачки, которое можно преобразовать в уравнение аperiodического звена, разделив обе части уравнения на  $S_0$  и получив коэффициенты уравнения:  $T=V/S_0$  - постоянную времени вакуумной системы,  $k=1/S_0$  - коэффициент усиления вакуумной системы:

$$T \frac{dx_2}{dt} + x_2 = kx_1, \quad (2)$$

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

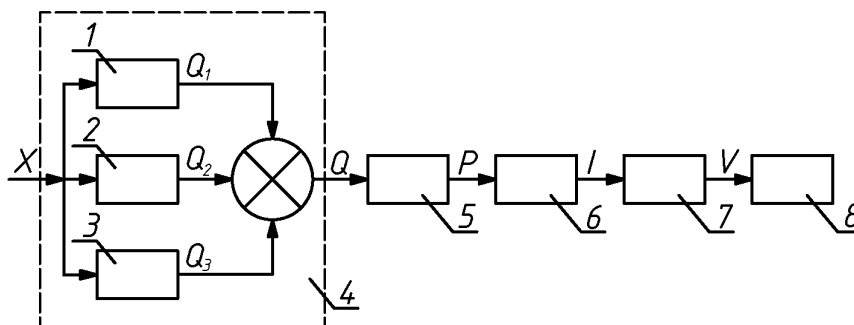


Рис. 6. Функциональная схема вакуумной системы диагностики отказов механизмов.

Для вакуумной камеры 5 входным воздействием будет поток газовыделения из механизма  $Q$ , а выходным сигналом (откликом системы на входное воздействие) - давление  $P$  в вакуумной камере. Выполним преобразование Лапласа для уравнения 2, т.е. проведем замену операции дифференцирования по времени на оператор Лапласа  $S$ . Найдем передаточную функцию вакуумной системы:

$$W_v = \frac{x_2(S)}{x_1(S)} = \frac{k}{TS + 1} \quad (3)$$

Рассматриваемая нами вакуумная система является динамической системой, которая описывается передаточной функцией для апериодического звена [4]. Ионизационный манометр 6 состоит из ионизационного преобразователя и электронного блока, включающего микроамперметр, регистрирующий величину ионного тока. Найдем передаточную функцию ионизационного преобразователя. Для этого запишем уравнение ионизационного преобразователя:

$$P = \frac{I}{K}, \quad (4)$$

где  $I$  – величина ионного тока в преобразователе;  
 $K$  – постоянная ионизационного преобразователя.

Тогда передаточная функция ионизационного преобразователя из уравнения 4 будет иметь вид:

$$W_i = \frac{I(S)}{P(S)} = K. \quad (5)$$

Таким образом, ионизационный преобразователь представляет собой усилительное звено с коэффициентом усиления  $K$ . Этот преобразователь является практически безынерционным, т.к. время перемещения образующихся при ионизации ионов под действием разности потенциалов от сетки-анода до коллектора ионов составляет около 0,05 мс. Именно эти ионы образуют ионный ток, по которому определяется величина давления  $P$  в вакуумной камере. Величина ионного тока измеряется при помощи микроамперметра за время около 10 мс. Если частота сигнала газового потока из пьезонатекателя или зоны трения контактных поверхностей в тестовом режиме не превышает 10 Гц, то этим временем измерения можно также пренебречь.

Определим постоянную времени  $T$  и коэффициент усиления  $k$  вакуумной системы ( $V=4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ ,  $S_0=5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ):  $T=4 \cdot 10^{-2}/5 \cdot 10^{-2}=0,8 \text{ с}$ ,  $k=1/5 \cdot 10^{-2}=20 \text{ с}/\text{м}^3$ . Если длительность прямоугольного импульса газового потока не менее 0,8с, то форма импульса давления будет

иметь форму аperiодического сигнала, как на рис.4а. При длительности прямоугольного импульса газового потока меньше, чем 0,8с форма импульса давления принимает вид пилообразного сигнала с уменьшенной амплитудой (рис.4б). Таким образом, динамические характеристики вакуумной системы накладывают ограничения на частоту следования и длительность импульсов газового потока из прецизионного пьезонатекателя 4 (рис. 1) или элементов трения вакуумного механизма. При этом можно проводить диагностику вакуумного механизма и при более высоких частотах, но амплитуда колебаний сигнала давления будет уменьшаться с ростом частоты, что будет затруднять процедуру диагностики и создавать ошибочное представление об отказе механизма. Калибровка вакуумной системы диагностики отказов механизмов в тестовом режиме происходит следующим образом: через пьезонатекатель 4 (рис. 1) задается частота и длительность прямоугольных импульсов газового потока, соответствующие частоте и длительности газовыделения из пар трения вакуумного механизма; определяются амплитуда колебаний и форма сигнала давления в вакуумной камере 2 при помощи ионизационного преобразователя 8, полученные данные используются при расшифровке сигнала потока газовыделения из вакуумного механизма.

Из теории газообмена [3] известно также, что процесс механически стимулированной десорбции происходит при выходе поверхностей из контакта, поэтому для системы диагностики важно учитывать тот факт, 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. Представленная модель диагностики позволяет применять её для всех видов вакуумных систем. Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) показано, что динамика изменения потока газовыделения и давления связана с процессами в зоне трения контактных поверхностей и характеристиками вакуумной системы; 2) анализ динамической модели вакуумной системы позволяет по параметрам измерения давления газов восстанавливать поток газовыделения, являющийся диагностируемым показателем «здоровья» механизма; 3) динамические характеристики вакуумной системы накладывают ограничения на частоту следования и длительность импульсов газового потока из прецизионного пьезонатекателя или элементов трения вакуумного механизма; 4) диагностику вакуумного механизма можно проводить и при более высоких частотах, но амплитуда колебаний сигнала давления будет уменьшаться с ростом частоты, что будет затруднять процедуру диагностики.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарности студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана Глушенкову А.В. и Тютюкину Е.Р. за помощь в подготовке статьи.

### **Литература**

1. Патент №1835065, Способ диагностики технического состояния циклически нагруженных элементов вакуумного оборудования. 15.08.1993. Бюл. №30.
2. Л. Н. Розанов. Вакуумная техника - М.: Высшая школа. 1990 - 320 с.
3. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms/ Deulin E.A., Mikhailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. / Springer edition.- 2012, 234pp.
4. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 560 с.