

axis wind turbine // Proc.IMEchE. Vol.222. Part C: J. Mechanical Engineering Science. 2008. Pp.1681-1694. **10.** *D.M.Sommers*. Design and experimental results for the S809 airfoil / Airfoils, incorporated state college, Pensilvania. NREL technical monitor: J.Tangler. Jan.1997. – 24 p. **11.** *К.В.Аврамов, К.Пьерр, Н.В.Ширяева*. «Уравнения нелинейных изгибно-изгибно-крутильные колебаний вращающихся стержней произвольного поперечного сечения» // Механіка та машинобудування. 2006, №1, стр.8-19. **12.** *К.В.Аврамов, К.Пьерр, Н.В.Ширяева*. «Нелинейные нормальные формы колебаний системы с гироскопическими силами» // ДНАН України. № 11, 2006. С. 7-10.

Поступила в редколлегию 15.02.2012

УДК 621.646.42

**Г.А. КРУТИКОВ**, докт. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков,  
**М.Г. СТРИЖАК**, асп., НТУ "ХПИ", Харьков

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ АНАЛОГОВОГО ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В статье описан метод выделения областей устойчивости электропневматического редуцирующего клапана с пропорциональным электроуправлением в пространстве его конструктивных параметров, приведен алгоритм реализации метода на ЭВМ и полученные графики.

У статті описаний метод виділення областей стійкості електропневматичного редуційного клапана з пропорційним електрокеруванням в просторі його конструктивних параметрів, наведений алгоритм реалізації метода на ЕОМ і отримані графіки.

This article describes the method for separating the regions of stability of electro-reducing valve with proportional electric control in the space of its design parameters, an algorithm implementing the method on a computer and the resulting graphs.

**Постановка задачи.** При переходе от редуцирующих клапанов (РК) с пружинным управлением к РК с пропорциональным электрическим управлением становится чрезвычайно острым вопрос устойчивости их работы. В этом случае пружину большой жёсткости, стабилизирующую равновесие мембранно-клапанного узла, требуется заменить упруго-вязкостными звеньями, использующими газодинамические эффекты для достижения устойчивой работы РК.

**Основные результаты.** На рис. 1 представлена расчётная схема РК с пропорциональным электроуправлением, у которого в целях стабилизации работы введена надмембранная демпфирующая камера. В линейной модели такого РК с механическим аналогом надмембранной демпфирующей камеры. (рис. 2) воздействие воздуха в

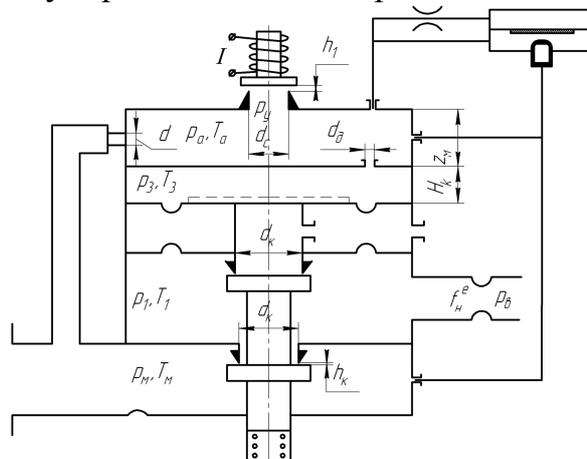


Рис. 1. Расчётная схема пропорционального РК с электроуправлением с надмембранной демпфирующей камерой

надмембранной камере на мембрану представим как действие пружины, верхний конец которой закреплен не жёстко, а через демпфер (т.е. подвержен действию вязкого трения), а нижний конец соединен с мембраной жёстко.

Значение присоединенной жесткости пневмопружины и коэффициента вязкого трения найдем из уравнения энергетического баланса газа в надмембранной камере, записанного в приращениях:

$$\begin{cases} \dot{p}_3 = -\frac{1}{\tau_1} p_3 - \frac{k \cdot p_{30}}{H_k} \dot{l}_1; \\ c_1 (l_1 - l) = p_3 \cdot F_M. \end{cases} \quad (1)$$

Отсюда: 
$$\left( \frac{k \cdot p_{30} \cdot \tau_1}{H_k} - \frac{\tau_1 \cdot c_1}{F_M} \right) \Delta l_1 + \frac{\tau_1 \cdot c_1}{F_M} \Delta l_1 + k \frac{c_1}{F_M} (\Delta l_1 - \Delta l) = 0, \quad (2)$$

где  $p_3$  – давление в надмембранной камере;  $\alpha$  – проводимость дросселя надмембранной камеры;  $\tau_1 = F_M H_k / kRT\alpha$  – постоянная времени надмембранной камеры;  $l_1$  – перемещение верхнего задемпфированного конца фиктивной пружины;  $c_1$  – жесткость пневмопружины. Нижний конец пружины, имеющий координату  $l$  не испытывает воздействия вязкого трения, (первый член уравнения (2) равен нулю), т.е.:

$$c_1 = \frac{k \cdot p_{30}}{H_k} F_M; \quad (3)$$

Тогда: 
$$\frac{\tau_1 \cdot c_1}{k} \dot{l}_1 + c_1 (l_1 - l) = 0; \quad (4)$$

Член при  $l_1$  обозначим через  $h_1$  (коэффициент вязкого трения присоединенного звена демпфирования).

$$h_1 = \frac{\tau_1 \cdot p_{30}}{H_k} F_M; \quad (5)$$

Систему уравнений для РК получим в виде:

$$\begin{cases} \tau_2 \Delta \dot{p}_1 + \Delta p_1 = k_1 \Delta l + k_2 \Delta f_1^3; \\ m \Delta \ddot{l} + h \Delta \dot{l} + c \Delta l + c_1 (\Delta l - \Delta l_1) = -F_M \Delta p_1; \\ h_1 \Delta \dot{l}_1 = c_1 (\Delta l - \Delta l_1), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\tau_2 = W / RT \cdot F_\partial$  – постоянная времени нагрузочной линии РК;

$$F_\partial = \frac{k \cdot f_1^3}{2} \sqrt{\frac{g}{2RT}} \left( \frac{2i-1}{1-i} \sqrt{i_n(1-i_n)} + \sqrt{i_n(1-i_n)} \right) - \text{коэффициент самовыравнивания}$$

$$\text{нагрузочной линии РК; } k_1 = \frac{\mu_1 \pi d_k p_a k}{F_\partial} \sqrt{\frac{2g}{RT}} i(1-i) - \text{коэффициент усиления}$$

клапана по давлению.

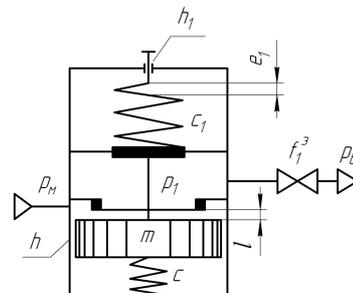


Рис. 2 . Расчётная схема РК

Характеристический полином передаточной функции по отношению к любому из возможных видов возмущающих воздействий представим в виде:

$$A_4s^4 + A_3s^3 + A_2s^2 + A_1s + A_0 = 0; \quad (7)$$

где  $A_0 = F_m \cdot k_1 \cdot c_1 + c_1 c$ ;  $A_1 = h_1 \cdot c_1 + h_1 c_1 + c_1 h + R_1 k_1 F + c_1 c - \tau_2$ ;

$A_2 = h_1 \cdot h + c_1 m + \tau_2 c h_1 + h_1 c_1 \tau_2 + c_1 h \tau_2$ ;  $A_3 = m h_1 + \tau_2 h_1 h + c_1 m \tau_2$ ;  $A_4 = h_1 m \tau_2$ .

Построение областей устойчивости по методу Неймарка (Д-разбиение) невозможно. Это обусловлено тем, что варьируемые параметры входят нелинейно в коэффициенты полинома знаменателя. Для построения областей устойчивости в этом случае необходимо использовать ЭВМ.

Условие устойчивости по Гурвицу имеет вид:

$$D = A_1 A_2 A_3 - A_0 A_3^2 - A_1^2 A_4 > 0.$$

Применим для нахождения границы области устойчивости на плоскости двух параметров метод слежения вдоль границы [2]. Направление изменения параметров на плоскости (рис. 3) происходит по сторонам квадрата: вниз, вверх; влево, вправо. После каждого шага проверяется условие устойчивости. Алгоритм представлен на рис. 4: в плоскости двух параметров системы  $A$  и  $B$  выделяется область допустимых значений этих параметров ( $A_n - A_k$ ,  $B_n - B_k$ ), исходя из габаритных ограничений и наиболее вероятных условий функционирования РК. Поиск границы устойчивости состоит из двух частей. Если, начиная из исходной точки поиска ( $A_0$ ,  $B_0$ ) при движении вдоль координаты  $A$ , мы не пересекли границы области устойчивости, то при достижении границы по  $A$  ( $A_k$ ),

происходит смещение на шаг по  $B$  ( $B_1 = B_0 + \Delta B$ ) и движение вдоль координаты  $A$ , начиная с нижней границы ( $A_n$ ). Если на данном шаге мы пересекаем границу и входим в искомую область, то меняется направления поиска и следующий шаг совершается вдоль другой координаты по часовой стрелке. Если после этого пересечение границы не наблюдается, то опять делается шаг по часовой стрелке и так до тех пор, пока не произойдет пересечение границы и выхода за пределы области (рис. 3).

Для реализации этого алгоритма вводится ряд идентификаторов ( $k, j, i, \gamma_1, \gamma_2$ ):  $k$  – для соблюдения очередности шагов вдоль координат  $A$  и  $B$ ;  $j$  – для выбора направления обхода квадрата;  $i$  – для смены стратегии поиска;  $\gamma_1, \gamma_2$  – для выбора направления шага вдоль  $A$  и  $B$  соответственно.

При выходе за область допустимых значений параметров  $A$  и  $B$  гурвициану  $D$  присваивается значение, равное (-1). Данный алгоритм позволяет обойти и выделить область, где  $D > 0$ .

В качестве варьируемых примем размеры надмембранной камеры и величину диаметра дросселя в надмембранной камере –  $F_m, H_k, \alpha$ , в качестве дополнительных параметров возьмем  $W, f_1^9$  и  $d_k$ .

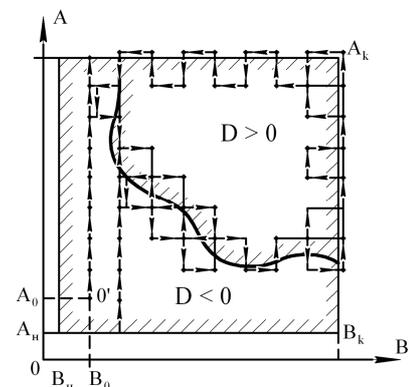


Рис. 3. Слежение вдоль границы устойчивости

На рис. 5 – 9 представлены результаты расчета областей устойчивости. Эти графики дают наглядную картину изменения области допустимых значений  $\alpha$  при изменении параметров  $H_k$ ,  $F_M$ ,  $W$ ,  $d_k$  и  $f_1^2$ . Значения остальных параметров следующие:  $p_M = 0,6$  МПа,  $p_1 = 0,35$  МПа,  $T = 300$  К,  $\mu_1 = 0,85$ ,  $p_b = 0,1$  МПа,  $m = 0,79 \cdot 10^{-1}$  кг,  $h = 50$  Н·сек/м. Анализ графиков на рис. 5 позволяет установить что: – чем меньше объем  $W$ , тем уже область допустимых значений  $H_k$  и  $\alpha$ ; – наибольший допуск на диаметр дросселя в надмембранной камере будет при половине максимально

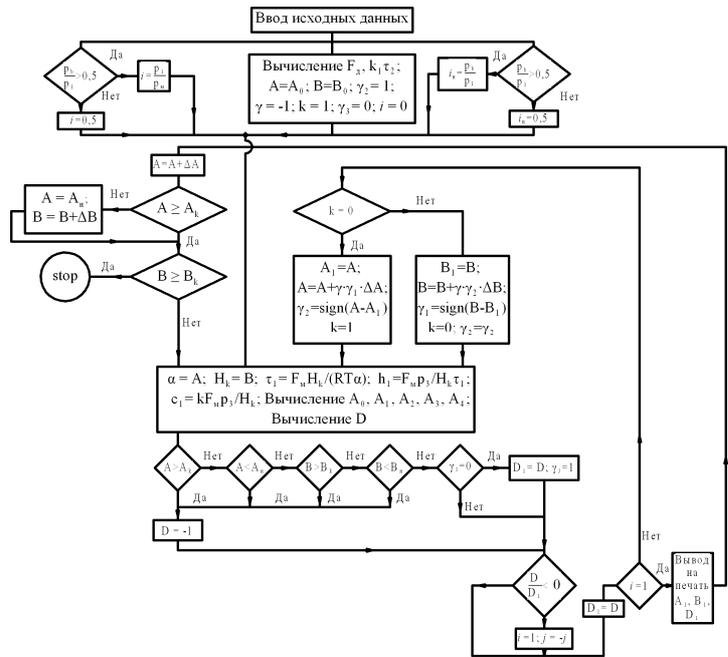


Рис. 4. Блок схема машинной реализации алгоритма слежения вдоль границы устойчивости

возможного диапазона изменения  $H_k$ ; – допуск на величину  $H_k$  будет максимальным при значении  $\alpha$ , отличном от нуля (то есть дросселирование воздуха через отверстие в надмембранной камере целесообразно). Графики на рис. 6 позволяют сделать следующие выводы: – при очень маленьких значениях  $F_M$  для устойчивой работы РК достаточно заданной величины  $h$  и  $c$ , поэтому все кривые асимптотически стремятся к этому значению  $F_M$ ; – при малых значениях  $H_k$  ( $0,6 \cdot 10^{-2}$  м и менее) с

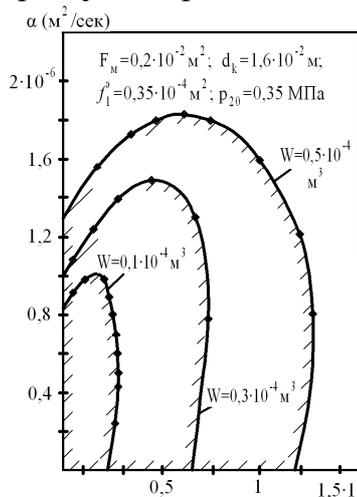


Рис. 5. Области устойчивости

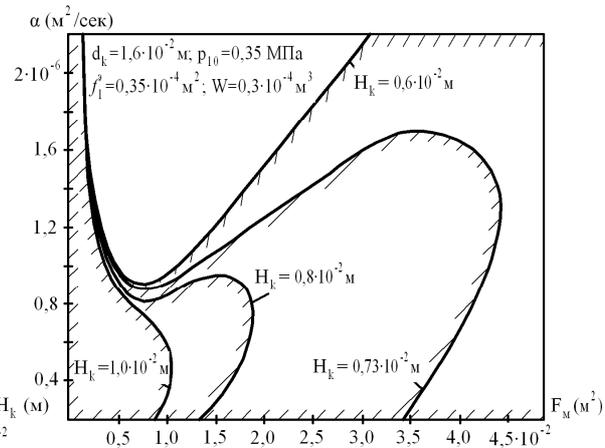


Рис. 6. Области устойчивости

увеличением  $F_M$  допуск на  $\alpha$  увеличивается (минимум допуска на  $\alpha$  имеет место при малых значениях  $F_M$ ); – при средних значениях  $H_k$  ( $0,8 \cdot 10^{-2}$  м –  $0,7 \cdot 10^{-2}$  м) с увеличением  $F_M$  сначала идёт увеличение допуска на  $\alpha$ , а затем его быстрое уменьшение со смещением поля допуска вверх по шкале  $\alpha$ ; – при значениях

$H_k > 0,9 \cdot 10^{-2}$  м с увеличением  $F_M$  допуск на  $\alpha$  уменьшается при некотором смещении поля допуска вверх от нулевого значения.

Из рис. 7 следует, что:

– с увеличением объёма нагрузочной линии РК ( $W$ ) допуск на  $\alpha$  растёт, однако его ширина даже для самых

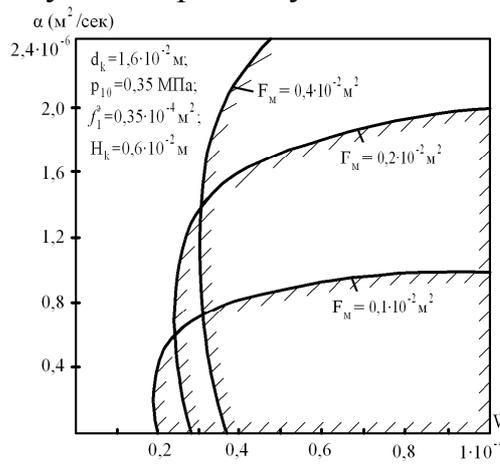


Рис. 7. Области устойчивости

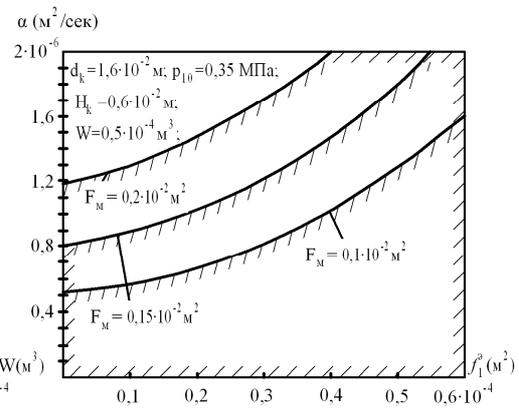


Рис. 8. Области устойчивости

больших значений  $W$  ограничена и зависит от величины  $F_M$ ; – чем меньше  $F_M$ , тем меньше минимальный объем, необходимый для устойчивой работы РК; – минимальное значение  $W$  для устойчивой работы РК имеем при значении  $\alpha$ , отличном от нуля, которое тем больше, чем больше  $F_M$ .

Из рис. 8 следует, что чем больше сопротивление нагрузочного тракта, тем уже допуск на диаметр отверстия в надмембранной камере.

Анализируя графики на рис. 9, можем установить, что:

– с увеличением диаметра седла клапана  $d_k$  допуск на  $\alpha$  уменьшается; с увеличением  $d_k$  поле допуска для  $\alpha$  смещается вверх по шкале  $\alpha$ , причем, чем больше  $F_M$ , тем выше смещается значение  $\alpha$ , при котором можно добиться максимального значения  $d_k$ ; чем больше  $F_M$ , тем шире поле допуска на  $\alpha$  в случае устойчивой работы РК; – наибольший допуск для  $d_k$  имеем при малом значении

$F_M$  ( $F_M = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ ), однако, при этом диапазон допустимых значений  $\alpha$  очень узок и мал по абсолютной величине.

В заключение рассмотрим области устойчивости по параметрам  $H_k - d_k$  и  $H_k - d_k$  (рис. 10 – 11). На рис. 10 представлены области устойчивости при изменении параметров  $H_k$  и  $d_k$  при разных значениях  $\alpha$ .

Для относительно больших значений  $\alpha$  ( $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ ) имеет в области допустимых значений параметров  $H_k$  и  $F_M$  две несвязанные между собой области устойчивости. При увеличении  $F_M$  от нуля система устойчива, затем идет область неустойчивой работы (в этом диапазоне изменений  $F_M$  не удается за счет

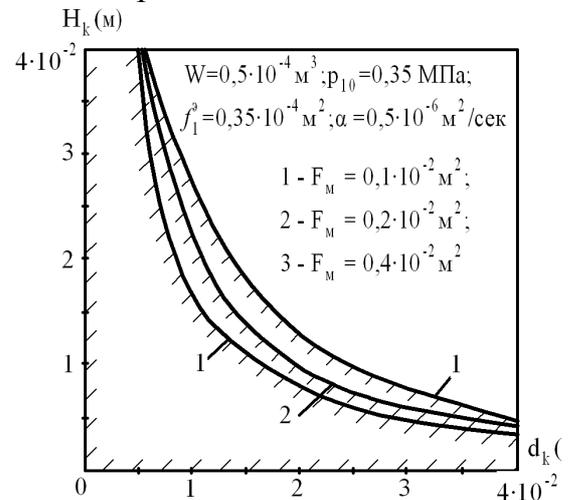


Рис. 9. Области устойчивости

вариации  $H_k$  добиться устойчивой работы), далее при увеличении  $F_M$  появляется зона устойчивой работы: сначала в узком диапазоне  $H_k$ , затем этот диапазон расширяется. При малых значениях  $\alpha$  ( $\alpha = 1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек) область устойчивости не имеет разрывов. Характерно, что с увеличением  $F_M$  допуск на  $H_k$  сначала уменьшается, затем на длительном участке изменения  $F_M$  остается практически неизменным, а

затем начинает медленно возрастать. При увеличении  $d_k$  допуск на  $H_k$  сужается, убывая практически по гиперболе (рис. 11).

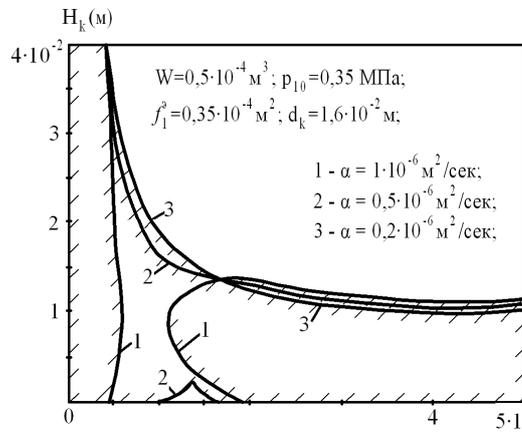


Рис. 10. Области устойчивости

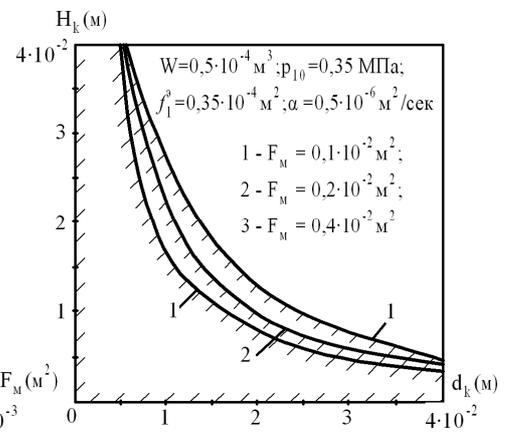


Рис. 11. Области устойчивости

**Заключение.** Построение областей устойчивости дает наглядную картину влияния параметров РК на устойчивость. Информацию о поведении системы в переходном режиме внутри области мы можем получить, построив кривые равного качества переходного процесса. Предложенный метод и полученные результаты полезны при проектировании электропневматических преобразователей, которые становятся всё более востребованными в качестве интерфейсных устройств в электропневматических системах.

**Список литературы:** 1. Залманзон Л.А. Об учёте влияния нелинейности характеристик глухих камер пневморегуляторов на процесс регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1955. – № 5.2. Теория автоматического управления. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова – М.: В. Шк.. – 1977.

Поступила в редколлегию 15.02.2012

УДК 621.74.043:669.795

**Ю.В. ДОЦЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск,

**В.Ю. СЕЛИВЕРСТОВ**, докт. техн. наук, проф., НМетАУ, Днепропетровск,

**В.В. МАЦИЙЧУК**, инж., ВТ "Интерметалл", Одесса

**С.В. МАЛЫХ**, канд. экон. наук, доц., ОНПУ, Одесса

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК СПОСОБОМ ЛИТЬЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

За допомогою розробленої методики проведено аналіз групи машин лиття під тиском і виявлена модель машини, показники якої найбільш конкурентоспроможні у своїй групі в даний час.

**Ключові слова:** машина лиття під тиском, гіпотетичний інноваційний зразок, конкурентоспроможність.