

## АНОТАЦІЯ

*Чжан Іхен* Обґрунтування параметрів прямих пасивних редуційних клапанів з механічною системою управління. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Одеський національний політехнічний університет, Міністерство освіти та науки України, Одеса, 2020.

Дисертаційне дослідження присвячене актуальним питанням синтезу та аналізу принципово нових прямих пасивних редуційних клапанів з механічною системою управління та обґрунтуванню їх структурних параметрів.

Підвищення вимог до якості та точності технологічних процесів, в разі їх інтенсифікації, підвищення ефективності використання існуючих прямих редуційних клапанів, як основного елемента, що у більшості випадків визначає працездатність трубопроводів, потребує їх значного удосконалення за показниками відповідності, кратності, а також зменшення їх масо-габаритних показників. Використання активних систем редукування тиску, що мають високий потенціал для зниження динамічних процесів в трубопроводі і працюють у режимі реального часу, у більшості випадків є нерентабельним, в наслідок значної вартості, і є виправданим тільки в умовах де вимоги до масо-габаритних показників обладнання є низькими. В даний час відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо розширення функціональних можливостей прямих пасивних редуційних клапанів, які мають в своєму складі типові дроселі, що і визначило напрямок проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

В дисертаційній роботі проведено аналіз існуючих конструкцій прямих пасивних редуційних клапанів. Аналіз проведений з використанням системи наукових принципів і методик, що дозволили обумовити області застосування

прямих пасивних редуційних клапанів, виконати порівняння їх функціональних можливостей, що пов'язані з їх кінематичними структурами, визначити основні напрямки їх розробки, а також встановити вплив їх характеристики редукування на динамічні процеси в трубопроводах різного призначення.

Основними науковими результатами роботи є наступні. У результаті проведеного критичного аналізу більшості типів існуючих прямих пасивних редуційних клапанів визначено, що з метою розширення їх функціональних можливостей найбільш перспективними є вирішення задач синтезу пов'язаних з розширенням додатковими механічними структурами структур існуючих прямих редуційних клапанів мембранного типу. Вперше для синтезу елементів гідро-пневмо апаратури, у вигляді принципово нових пасивних прямих редуційних клапанів, вдало використана методика, яка базується на аксіоматичній теорії синтезу пружних пристроїв з використанням теорії графів. В результаті застосування цієї методики: вперше запропоновано при аналізі і синтезі прямих пасивних редуційних клапанів з додатковою механічною системою управління використовувати в якості моделі модифіковані кінематичні графи, уточнивши існуючу модель у вигляді мультиграфу, явно вираженим орграфом, який визначає основну функціональну взаємодію елементів клапана; при синтезі прямих пасивних редуційних клапанів з додатковою механічною системою управління, вперше в графовій моделі пристрою, у вигляді модифікованого кінематичного графу, науково обґрунтована заміна віртуальної кінематичної пари 4-го класу на її реальний аналог, показано, що дана заміна призводить до багатоваріантності рішень; запропоновано для вибору оптимального рішення, в разі їх багатоваріантності, використовувати в матрицях складання, при визначенні енергії графів, вагових коефіцієнтів в наступному пріоритеті: «основний параметр» - «допоміжний параметр» - «технологічна складність виготовлення»; синтезовано два

принципово нових пасивних редукційних клапана, оригінальність яких підтверджена відповідними патентами на винаходи України та КНР.

В роботі вперше розроблено математичні моделі та розрахункові схеми для отриманого, при проведену синтезі, оптимального рішення, яке у подальшому отримало конструктивну реалізацію. Це дозволило, шляхом варіації конструктивними параметрами отримати характеристики редукування, які неможливо реалізувати за допомогою відомих конструкцій прямих пасивних редукційних клапанів. Науково обґрунтований тісний взаємозв'язок між геометричними параметрами додаткової механічної системи управління і характеристикою редукування, що обумовило напрямки досліджень по відтворенню цільових характеристик редукування. При цьому встановлено що показники ефективності запропонованого редукційного клапана значно вищі ніж у існуючих (коефіцієнт відповідності  $k_B = 0,86...0,95$  на відміну від існуючих  $k_B = 0,56...0,75$ , та коефіцієнт кратності  $k_K = 2...5$  на відміну від існуючих  $k_K=1,5...2,4$ ).

Автором запропоновано математичну модель для визначення динамічної стійкості розроблених пристроїв, при цьому науково обґрунтовано використання різних моделей тертя в залежності від виду робочого тіла. При застосуванні чисельного методу Рунге-Кутта та діаграм Кенінгса-Ламерея встановлено, що запропонований пристрій є динамічно стійким, а можливість виникнення автоколивань пов'язане лише з величиною коефіцієнта в'язкості робочого тіла  $\beta$  та з величиною витрати на вході клапану  $Q$ .

В роботі проведені порівняльні дослідження динаміки гідравлічної системи, до складу якої окрім редукційного клапану входять інші елементи гідроапаратури. У якості контрольного пристрою використано широко розповсюджений редукційний клапан РД-120. Встановлено, що при зміні подачі насоса (при незмінних інших вихідних даних) в досліджуваному діапазоні стале значення тиску в системі залишається практично на одному рівні, проте для

клапана типу РД коливання тиску становить 12 ... 15%, а для запропонованого клапана 6 ... 8%, що відповідає очікуваній витратно-перепадній характеристиці; зміна запобіжного обсягу робочого тіла і сили тертя істотно не впливає на якість перехідного процесу, а сталі значення тиску в системі  $p_1$  залишається незмінним. При малих витратах для клапана типу РД спостерігаються пульсації тиску  $p_1$  (близько 15% від сталого значення), а для запропонованого клапана пульсації тиску практично відсутні (менше 2% від сталого значення).

Автором запропонована процедура формалізації складання математичного опису прямого пасивного редуційного клапана з механічною системою управління для оцінки його працездатності за критеріями помилки при спрацьовуванні та герметичності. Результати математичного моделювання по визначенню впливу різних чинників на помилку спрацьовування розглянутого клапана свідчать, що вони можуть носити як лінійний так і нелінійний характер в залежності від фактора, що змінюється. Встановлено, що існуючий критерій працездатності у вигляді герметичності до запропонованого клапану застосовувати не можливо в наслідок його конструктивних відмінностей від існуючих.

Виготовлені експериментальні зразки та стенд для випробувань. Автором розроблена програма низки експериментів після проведення яких підтверджено: адекватність розроблених розрахункових схем та математичних моделей пропонованого пристрою; теоретичні положення про тісний взаємозв'язок кривизни паза направляючої пластини пропонованого клапана і його характеристики редукування (похибка між теоретичними і експериментальними даними становить 6...14 %); теоретичні положення про автономну стабілізацію тиску на «виході» клапана при зміні тиску на «вході» (похибка між теоретичними і експериментальними даними склала 8...16 %); теоретичні положення про автономну стабілізацію тиску «за клапаном» при зміні сумарної

витрати в системі за «входом» з клапану (імітація «включення споживачів»), Похибка між теоретичними і експериментальними даними склала 8...15 %.

Таким чином поставлені в дисертаційній роботі цілі були досягнуті, а сформульовані наукові завдання – вирішені.

Практичну цінність дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження результатів до промисловості, а саме *Huzhou Machine Tool Works Co.,Ltd* (КНР) і ТОВ "ЕЛЕМЕНТ" м. Одеса. а також використовуються при виконанні держбюджетних НДР Міністерства освіти України. Основні положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використовуються у навчальному процесі Інституту промислових технологій, дизайну і менеджменту, Одеського національного політехнічного університету.

*Ключові слова:* пасивній редуційний клапан, механічна система управління, кінематичний граф, модифікований кінематичний граф, матриця складання, цільова характеристика редукування.

## **ABSTRACT**

*Zhang Yiheng.* Substantiation of parameters of direct passive pressure reducing valves with mechanical control system. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 131 "Applied Mechanics". - Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The dissertation research is devoted to actual questions of synthesis and the analysis of designs of essentially new direct passive reducing valves with mechanical control system and substantiation of their structural parameters.

Improving the requirements for quality and accuracy of technological processes in case of their intensification, increasing the efficiency of existing valves of direct pressure reduction as the main element determining the efficiency of pipelines, requires their significant improvement in terms of compliance, multiplicity and reduction of their weight and size. The use of active pressure reduction systems that have a high potential to reduce dynamic processes in the pipeline and work in real time, in most cases is unprofitable, due to the significant cost, and is justified only in conditions where the requirements for mass and size of equipment are low.

Currently, there are no scientifically sound recommendations for expanding the functionality of direct passive pressure reducing valves, which include typical chokes, which determined the direction of theoretical and experimental studies.

In the dissertation work the analysis of existing designs of direct passive reduction valves is carried out. The analysis was performed using a system of scientific principles and techniques that allowed to determine the scope of direct passive pressure reducing valves, to compare their functionality associated with their kinematic structures, to determine the main directions of their development, as well as to establish the impact of their reduction characteristics on dynamic processes in pipelines for various purposes.

The main scientific results of the work are as follows. As a result of critical analysis of most types of existing direct passive pressure reducing valves, it was determined that in order to expand their functionality the most promising are the synthesis problems associated with the expansion of additional mechanical structures of existing direct pressure reducing valves membrane type.

For the first time for the synthesis of elements of hydro-pneumatic equipment, in the form of fundamentally new passive direct reduction valves, a technique based on the axiomatic theory of synthesis of elastic devices using graph theory was successfully used. As a result of this technique: for the first time it is proposed to use modified kinematic graphs as a model in the analysis and synthesis of direct passive

pressure relief valves with an additional mechanical control system with refinement of the existing model in the form of a multigraph; in the synthesis of direct passive pressure reducing valves with an additional mechanical control system, for the first time in the graph model of the device, in the form of a modified kinematic graph, scientifically substantiated replacement of virtual kinematic pair of 4th class with its real analogue, it is shown that this replacement leads to a variety of solutions; proposed to select the optimal solution, in the case of their multivariate, to use in the addition matrices, when determining the energy of graphs, weights in the following priority: "main parameter" - "auxiliary parameter" - "technological complexity of manufacture"; two fundamentally new passive pressure reducing valves were synthesized, the originality of which was confirmed by the corresponding patents for inventions of Ukraine and China.

For the first time, mathematical models and calculation schemes for the optimal solution obtained during the synthesis were developed in the work, which later received a constructive implementation. This allowed, by varying the design parameters to obtain the characteristics of the reduction, which cannot be realized with the known designs of direct passive pressure reducing valves. The close relationship between the geometric parameters of the additional mechanical control system and the recovery characteristic is scientifically substantiated, which led to the directions of research of reproduction of the target characteristics of reduction. It was found that the efficiency of the proposed pressure reducing valve is much higher than the existing ones (compliance factor  $k_v = 0.86... 0.95$  in contrast to the existing  $k_v = 0.56... 0.75$ , and the multiplicity factor  $k_k = 2... 5$  in contrast from the existing  $k_k = 1.5... 2.4$ ).

The author proposes a mathematical model to determine the dynamic stability of the developed devices, while scientifically substantiated the use of different models of friction depending on the type of working fluid. Using the numerical Runge-Kutta method and Kennings-Lamiere diagrams, it was found that the proposed device is

dynamically stable, and the possibility of self-oscillations is associated only with the value of the viscosity coefficient  $\beta$  and the value of the flow at the valve inlet  $Q$ .

The comparative researches of dynamics of hydraulic system which structure besides the reducing valve includes other elements of the hydraulic equipment are carried out in work. A widely used pressure reducing valve RD - 120 is used as a control device. It is established that at change of giving of the pump (at constant other initial data) in the investigated range the constant value of pressure in system remains practically at one level, however for the valve of type RD pressure fluctuations make 12 ... 15%, and for the offered valve 6 ... 8%, which corresponds to the expected cost-difference characteristic; the change in the safety volume of the working fluid and the friction force does not significantly affect the quality of the transient process, and the constant value of the pressure in the system  $p_1$  remains unchanged. At low costs for the valve type RD there are pressure pulsations  $p_1$  (about 15% of the constant value), and for the proposed valve pressure pulsations are almost absent (less than 2% of the constant value).

The author proposes a procedure for formalizing the mathematical description of a direct passive pressure reducing valve with a mechanical control system to assess its performance by the criteria of error in operation and tightness. The results of mathematical modeling to determine the influence of various factors on the error of the valve in question indicate that they can be both linear and nonlinear depending on the changing factor. It is established that the existing criterion of efficiency in the form of tightness to the offered valve cannot be applied owing to its constructive differences from existing.

Experimental samples and a test stand were made. The author developed a program of a number of experiments after which it was confirmed: the adequacy of the developed calculation schemes and mathematical models of the proposed device; theoretical provisions on the close relationship of the curvature of the groove of the guide plate of the proposed valve and its reduction characteristics (the error between



theoretical and experimental data is 6... 14%); theoretical provisions on the autonomous stabilization of the pressure at the "outlet" of the valve when the pressure at the "inlet" changes (the error between theoretical and experimental data was 8... 16%); theoretical provisions on the autonomous stabilization of pressure "behind the valve" when changing the total flow in the system at the "inlet" of the valve (imitation of "consumer inclusion"), the error between theoretical and experimental data was 8... 15%.

Thus, the goals set in the dissertation were achieved, and the formulated scientific tasks were solved.

The practical value of the dissertation is confirmed by the acts of implementation of results in the industry, namely Huzhou Machine Tool Works Co., Ltd (China) and "ELEMENT". LLC (Ukraine, Odessa) and are also used in the implementation of state budget research of the Ministry of Education of Ukraine. The main provisions, conclusions and recommendations set out in the dissertation are used in the educational process of the Institute of Industrial Technology, Design and Management, Odessa National Polytechnic University.

*Key words:* passive reduction valve, mechanical control system, kinematic graph, modified kinematic graph, addition matrix, target characteristic of reduction.