

ANALYTICAL MODELING, RESEARCH AND CONTROL OF PHYSICAL LABORATORY *FESTO*-MODEL INSTALLATION OF TECHNOLOGY-part 1 (modeling and analysis)

АНАЛИТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ФИЗИЧЕСКИ ЛАБОРАТОРЕН *FESTO*-МОДЕЛ НА ТЕХНОЛОГИЧНА ИНСТАЛАЦИЯ-част 1 (моделиране и анализ)

Emil Nikolov, Nina Nikolova, Boris Grasiani

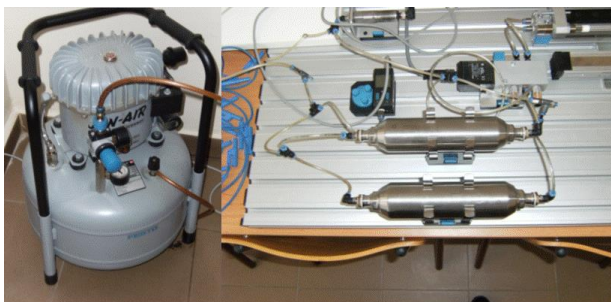
Technical University Sofia; 8, Kliment Ohridski str., Sofia-1000, Bulgaria, FA, DIA
 nicoloff@tu-sofia.bg; ninan@tu-sofia.bg; bgrasiani@tu-sofia.bg

Abstract: The work proposed analytical modeling the processes in laboratory pneumatic *FESTO*-model. The characteristics of the proposed analytical model are simulated and analyzed. Systems for control of laboratory installation are synthesized. Designing control systems are modeled and their performance is analyzed. Is confirmed and proven their efficiency.

Keywords: analytical modeling, analysis of the characteristics, synthesis of control systems and analysis of performance

ВЪВЕДЕНИЕ

Разглежда се лабораторен физически *FESTO*-модел на технологична въздухподготвителна пневматична инсталация. *FESTO*-моделът е показан на фиг.1.a. На фиг.1.b. е илюстрирана съответстващата му функционална схема. *FESTO*-моделът е изграден от: компресор *K* с електродвижане *E* и автономна система за стабилизация *C* на изходното налягане P^0 ; регулиращ орган *PO* с входна величина - позицията на дроселиращата му система *l* и изходна величина - разхода на въздух Q_{PO} ; регулируем дросел *D* за определяне на пневматичното натоварване β на *PO*; акумулаторен буфер с обем *V*, в който P_V е захранващо налягане към следващи пневматични технологични консуматори. Целта на изследването е:

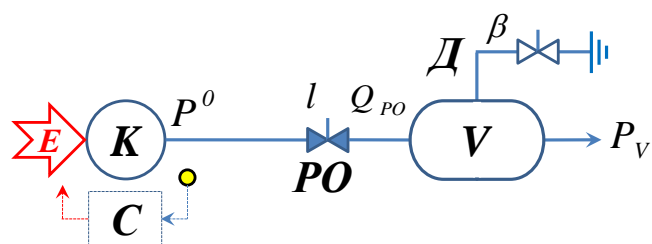


Фиг.1.a. Лабораторна инсталация.

АНАЛИТИЧНО ОПИСАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКИ ЛАБОРАТОРЕН *FESTO*-МОДЕЛ

Разглежда се функционалната структура на известен елемент [13] ÷ [14] от теорията на линейната газова динамика - пневматична камера (фиг.2). Тя се състои от два линейни пневматични дросела с проводимости α и β , пневмокондензатор с обем *V* и пневматични линии за връзка на работния свиваем флуид (въздух) с работно налягане, определящо неговото движение в линеен ламинарен режим на „еднофазна течност“. В стационарен ламинарен режим на движение на флуида разходите Q_1 , Q_2 , Q_V през отделните съставлящи на схемата (фиг.2) се из-

- аналитично моделиране на процесите на лабораторния физически *FESTO*-модел,
- синтез на системи за управление на *FESTO*-модела, а задачите в нейното изпълнение са:
- приложение на обобщено уравнение на газовата динамика на количеството на движение на работния флуид за извод на аналитичното описание на динамиката на физическия модел; моделиране, симулиране и изследване на характеристиките на физическия модел като обект за управление; обобщаващи изводи на резултатите;
- параметричен и структурен синтез на системи за управление на *FESTO*-модела и анализ на тяхното качество. Разработката е представена в две неразделни части. Настоящата е първата и представя резултатите от моделирането и анализа на *FESTO*-модела. Втората част обхваща синтеза на системите за управление, анализа на тяхното качество и литературата.



Фиг.1.b. Функционална схема.

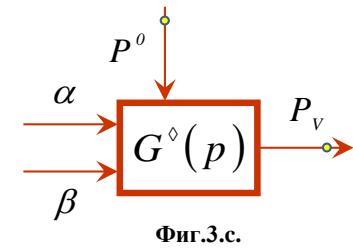
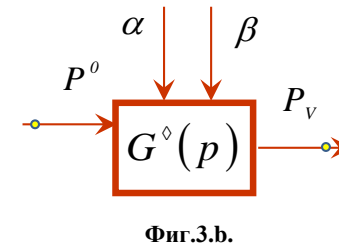
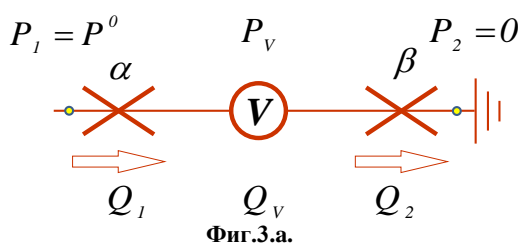
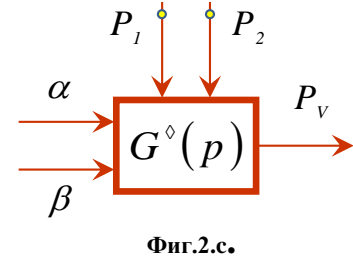
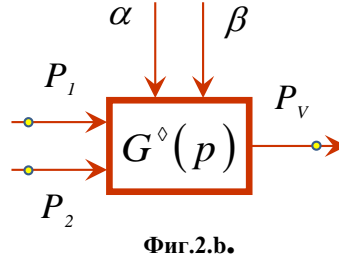
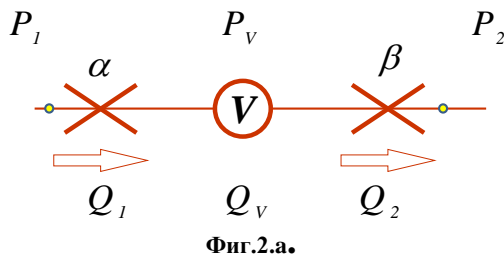
разяват с (1) ÷ (3), а в нестационарен ламинарен режим на функциониране (изменения в стойностите на наляганията и/или проводимостите) е в сила уравнението на *Benoit Paul Émile Clapeyron* за идеален [1] ÷ [12], [15], [24] ÷ [27] свиваем флуид от газовата динамика (4). В (4) R е универсалната газова константа, а Θ - абсолютната температура на флуида, въз основа на които и с отчитане на (1) ÷ (3), следва (5). Зависимостта (5) еквивалентно се трансформира до (6) ÷ (8) до получаване на **базовото диференциално уравнение на газовата динамика** (9), (10). То описва нестационарния режим на функциониране на схемата (фиг.2). Променливите в (9) ÷ (10) са: входните физическите величини - наляганията P_1 и P_2 ;

изходната величина - налягането P_V ; смущаващите въздействия - проводимостите α и β (фиг.2.b.). Друг възможен структурен модел въз основа на (9) ÷ (10) е показан на фиг.2.c.

В този случай входните физически величини са: проводимостите α и β ; изходната величина е налягането P_V ; смущаващи въздействия са наляганята P_1 и P_2 . Нека да бъде анализирана разглежданата функционална

структура (фиг.2) за $P_2 = 0$; $P_1 = P^0 = const$ (11), както това е илюстрирано на фиг.3. За този случай (11)-фиг.3 базовото диференциално уравнение (9) се трансформира еквивалентно на (12).

Променливите в уравнение (12) са: входната физическа величина - налягането $P_1 = P^0 = const$; изходната величина е налягането P_V ; смущаващите въздействия са проводимостите α и β (фиг.3.b.).



$$Q_1 = Q_2 = Q_V, \quad (1)$$

$$Q_1 = \alpha \Delta P_1 = \alpha (P_1 - P_V), \quad (2)$$

$$Q_2 = \beta \Delta P_2 = \beta (P_V - P_2), \quad (3)$$

$$\Delta Q_V(t) = Q_1(t) - Q_2(t) = \frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt} = \alpha (P_1(t) - P_V(t)) - \beta (P_V(t) - P_2(t)), \quad (5)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt} = \alpha P_1(t) - \alpha P_V(t) - \beta P_V(t) + \beta P_2(t), \quad (6)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt} = \alpha P_1(t) - (\alpha + \beta) P_V(t) + \beta P_2(t), \quad (7)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt} = \alpha P^0(t) - (\alpha + 1) P_V(t) + \beta P_2(t), \quad (8.a)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta} \frac{dP_V(t)}{dt} + (\alpha + \beta) P_V(t) = \alpha P_1(t) + \beta P_2(t), \quad (8.b)$$

$$\frac{V}{\mathcal{R}\Theta(\alpha + \beta)} \frac{dP_V(t)}{dt} + P_V(t) = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} P_1(t) + \frac{\beta}{(\alpha + \beta)} P_2(t), \quad (9)$$

$$T \frac{dP_V(t)}{dt} + P_V(t) = k_1 P_1(t) + k_2 P_2(t), \quad (10.a)$$

$$T = \frac{V}{\Re \Theta (\alpha + \beta)} ; 0 \leq k_1 = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} \leq 1 ; 0 \leq k_2 = \frac{\beta}{(\alpha + \beta)} \leq 1 ; \quad (10.b)$$

$$(k_1 + k_2) = 1 ; k_1 = (1 - k_2) ; k_2 = (1 - k_1)$$

$$(T p + 1) P_V (p) = k_1 P_1 (p) + k_2 P_2 (p), (p = \sigma + j\omega), \quad (10.c)$$

$$P_2 = 0 ; P_1 = P^0 = const, \quad (11)$$

$$\frac{V}{\Re \Theta (\alpha + \beta)} \frac{dP_V (t)}{dt} + P_V (t) = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} P^0, \quad (12.a)$$

$$T \frac{dP_V (t)}{dt} + P_V (t) = k_1 P^0, \quad (12.b)$$

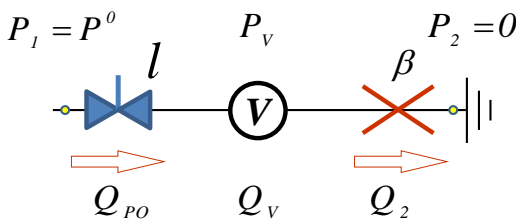
$$T = \frac{V}{\Re \Theta (\alpha + \beta)} ; 0 \leq k_1 = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} \leq 1, \quad (12.c)$$

$$(T p + 1) P_V (p) = k_1 P^0, (p = \sigma + j\omega). \quad (12.d)$$

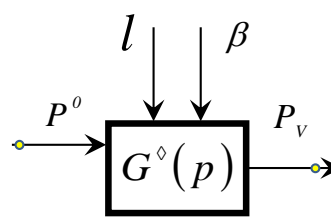
Друг възможен структурен модел въз основа на (12) е показан на фиг.3.с. В този случай входните физически величини са проводимостите α и β , изходната величина е налягането P_V , а „смушавашо“ въздействие е налягането $P_1 = P^0 = const$. Нека вместо дросел с проводимост α в схемата (фиг.3), за която са в сила зависимостите (11) и $P_1 = P^0 = const$, да участва регулиращ орган **PO** с линейна разходна характеристика Q_{PO} (13), както това е показано на фиг.4. За този случай (фиг.4) следва, че разходът Q_1 ще се определя отново като (2), но като се отчете [13] разходната характеристика на регулиращ орган **PO** $Q_{PO} \equiv Q_1$ (13), (14) (заместил в схемата дросела с проводимост α), то разходът Q_1 (2) ще се определя с (14), а еквивалентната проводимост α_{PO} на **PO** - с (15). След заместване на проводимостта (15) на

PO в моделиращото (фиг.4) диференциално уравнение (12), последното се трансформира в (16) с указаните еквивалентни преобразувания и субституции (16.с) и позволява да се изведе аналитично съответстващото на (16.е) операторно уравнение (16.ф). Променливите в уравнения (16) са: входната физическа величина - налягането $P_1 = P^0 = const$, изходна величина е налягането P_V , а смушавачи въздействия са позицията l на **PO** и проводимостта $\beta = I$ (фиг.4.б.). Друг възможен структурен модел въз основа на (16) е показан на фиг.4.с. В този случай входните физическите величини са позицията l и проводимостта β , изходна величина е P_V , а „смушавашо“ въздействие е P^0 .

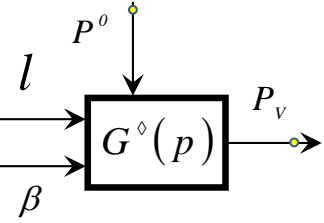
В предлагания модел съществува *структурната зависимост (16) по входната променлива α по изходната променлива P_V* (16), (17).



Фиг.4.а.



Фиг.4.б.



Фиг.4.с.

$$Q_1 \equiv Q_{PO} (l) \equiv l, (Q_{PO} / Q_{PO,max} = l), \quad (13)$$

$$Q_1 = \alpha \Delta P_1 = \alpha (P_1 - P_V) \equiv Q_{PO} (l) = l, \quad (14)$$

$$\alpha_{PO} = \alpha = l (P^0 - P_V)^{-1}, \quad (15)$$

$$\frac{V}{\Re \Theta (l (P^0 - P_V)^{-1} + \beta)} \frac{dP_V (t)}{dt} + P_V (t) = \frac{(P^0 - P_V)^{-1} P^0}{(l (P^0 - P_V)^{-1} + \beta)} l (t), \quad (16.a)$$

$$\frac{V(P^0 - P_v)}{\mathcal{R} \Theta (l + \beta (P^0 - P_v))} \frac{dP_v(t)}{dt} + P_v(t) = \frac{P^0}{(l + \beta (P^0 - P_v))} l(t), \quad (16.b)$$

$$b_1 = (P^0 - P_v) = \text{const}_1; \beta = \text{const}_2; b_2 = \beta (P^0 - P_v) = \text{const}_3, \quad (16.c)$$

$$\frac{V b_1}{\mathcal{R} \Theta (l + b_2)} \frac{dP_v(t)}{dt} + P_v(t) = \frac{P^0}{(l + b_2)} l(t), \quad (16.d)$$

$$\frac{V b_1}{\mathcal{R} \Theta (l + b_2)} \frac{dP_v(t)}{dt} + P_v(t) = \frac{P^0}{(l + b_2)} l(t), \quad (16.e)$$

$$\left(\frac{V b_1}{\mathcal{R} \Theta (l + b_2)} p + 1 \right) P_v(p) = \frac{P^0}{(l + b_2)} l(p), \quad (p = \sigma + j\omega), \quad (16.f)$$

$$G^\circ(l, P_v, p) = \frac{P_v(p)}{l(p)} = \frac{P^0}{(l + b_2)} \left(\frac{V b_1}{\mathcal{R} \Theta (l + b_2)} p + 1 \right)^{-1}, \quad (p = \sigma + j\omega), \quad (17.a)$$

$$G^\circ(l, P_v, p) = \frac{P_v(p)}{l(p)} = \frac{k(l)}{(T(l)p + 1)}, \quad (p = \sigma + j\omega), \quad (17.b)$$

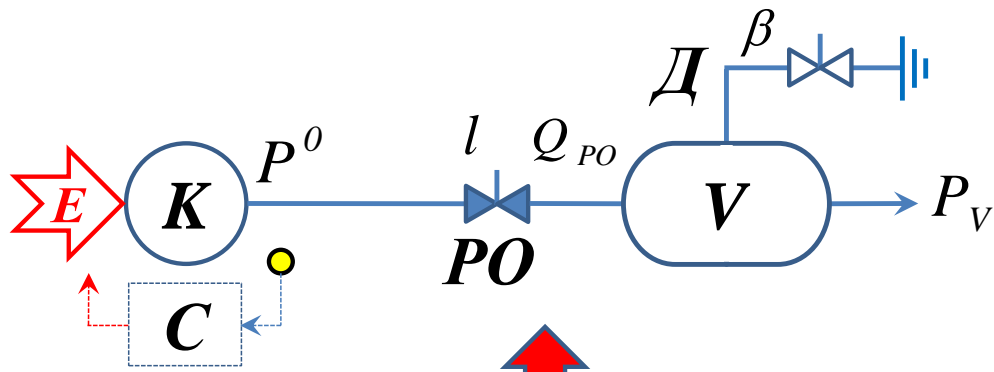
$$\begin{aligned} k(l) &= P^0 (l + b_2)^{-1}; \quad T(l) = V b_1 (\mathcal{R} \Theta (l + b_2))^{-1} \\ (b_1 = (P^0 - P_v) = \text{const}_1; \beta = \text{const}_2; b_2 = \beta (P^0 - P_v) = \text{const}_3; P^0 = \text{const}) \end{aligned} \quad (17.c)$$

Моделиращото процесите в схемата (фиг.4) диференциално уравнение (16) и операторно уравнение (16.f) позволяват да се определи и нестационарната предавателна функция $G^\circ(l, P_v, p)$ (17), за която в (17.c) са показани параметричните зависимости в използваните субституции. Използвани са означенията за: обем $V, [m^3]$, универсална газова константа $\mathcal{R} = 273, [J/\mathcal{K}^0]$ за въздуха, абсолютната температура на флуида $\Theta = 20, [C^0]$, константите $b_1, [atm]$ $b_2, [atm (m^3 / atm)]$. Следващият етап в използваната процедура по аналитичното моделиране на процесите в лабораторният физически **FESTO**-модел (фиг.1) се основава на еквивалентна на фиг.4 динамична система (изобразена на фиг.5), за която входната величина е позицията l на **PO**, изходната величина е налягането P_v в пневмокондезатора с обем V . Динамичната система (фиг.5) се характеризира със **структурна зависимост** (16) по входната променлива l и по изходната променлива P_v . Това е отразено в моделиращото процесите в нея нестационарното диференциално уравнение (16) и в нестационарната предавателна функция (17). Разгледаната на фиг.5 **динамична система** (16), (17) е предложеният в настоящата разработка аналитичен и структурен модел на процесите в лабораторния (фиг.1) **FESTO**-модел, където [28] с Ψ_l и с Ψ_{P_v} на фиг.5.b е означена **структурната зависимост** (17.c).

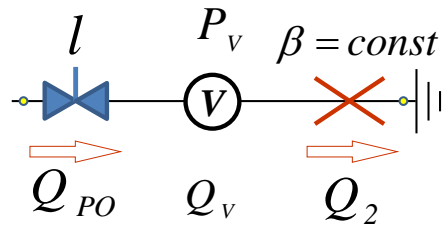
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ФИЗИЧЕСКИ ЛАБОРАТОРЕН **FESTO**-МОДЕЛ КАТО ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Предложеното еквивалентно аналитично описание (16), (17) на лабораторният физически **FESTO**-модел е симулирано. Резултатите, като характеристики на **FESTO**-модела на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация, са показани както следва. На фиг.6 и фиг.7 са илюстрирани в **2D**-мерен параметричен плот за-

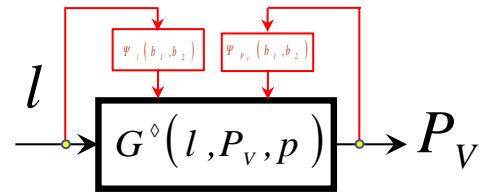
висимостите (16.c) на използваните субституции в **структурната зависимост** (16) по входната променлива l и по изходната променлива P_v , условно означени с Ψ_l и с Ψ_{P_v} на фиг.5.b. Илюстрираните резултати от симулация са при стойности на константите и диапазоните на променливите в предложения аналитичен модел (16), (17), които са показани в (18). За използваните при симулационните резултати (фиг.6, фиг.7) стойности на константите и диапазоните на променливите (18), стойностите на коефициентите b_1 и b_2 в субституциите се променят в диапазоните (19). На фиг.8 и фиг.9 са илюстрирани в **2D**-мерен параметричен плот зависимостите (17.c) на стойностите на динамичните параметри на аналитичния модел в **структурната зависимост** (17) по входната променлива l и по изходната променлива P_v , условно означени с Ψ_l и с Ψ_{P_v} на фиг.5.b. Илюстрираните резултати са от симулация при стойности на константите и диапазоните на променливите, показани с (18). За използваните при симулационните резултати (фиг.8, фиг.9) стойности на константите и диапазоните на променливите, динамичните параметри (предавателен коефициент $k(l)$ и времеконстанта $T(l)$) на аналитичния модел се променят в диапазоните (20). На фиг.10, фиг.11 са илюстрирани в **2D**-мерен параметричен плот преходните h_{P_v} , импулсните преходни функции i_{P_v} и честотни $G_{P_v}^\circ$ характеристики на предложението в работата аналитичен модел (16), (17) на процесите в лабораторния физически **FESTO**-модел на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация. Видими са особеностите на моделираната динамична система. Тя е типично нестационарно аperiодично звено от първи пълен ред, чиито параметри (предавателен коефициент и времеконстанта) се менят в зависимост от размера на входната променлива l и размера на изходната променлива P_v на модела.



$P^0 = const$ $P_2 = 0$



Фиг.5.а.

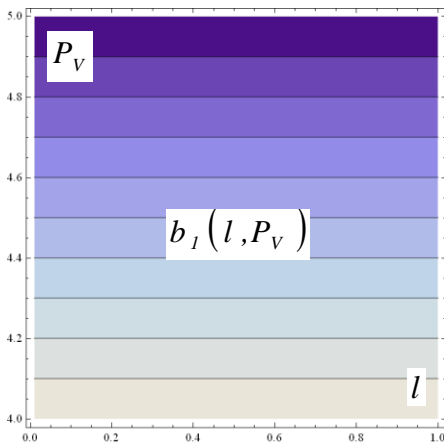


Фиг.5.б.

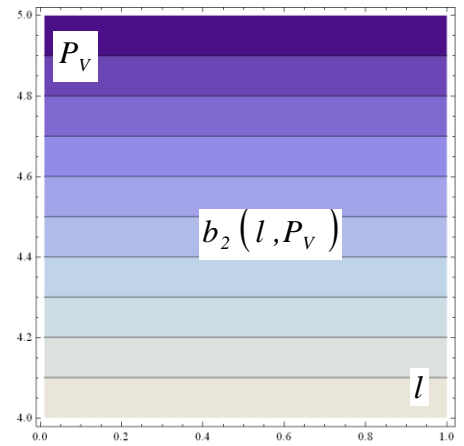
$$0,001 \leq l \leq 0,1 ; 4 \leq P_V \leq 5, atm ; V=0,001, m^3 ; P^0 = 6, atm ; \beta=0,05, atm(m^3/atm) ; \Theta=20, C^0 ; \mathcal{R}=273, J/kg.K^0 \quad (18)$$

$$1,00 \leq b_1 \leq 2,00 ; 0,06 \leq b_2 \leq 0,10 , \quad (19)$$

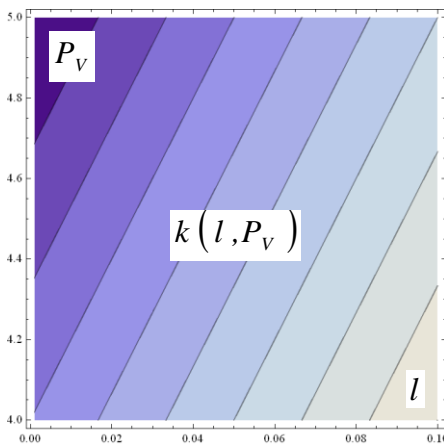
$$0,40 \leq k(l) \leq 1,00 ; 0,50 \leq T(l) \leq 2,00, sec . \quad (20)$$



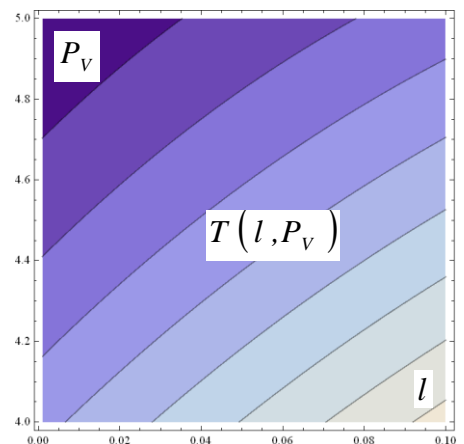
Фиг.6.



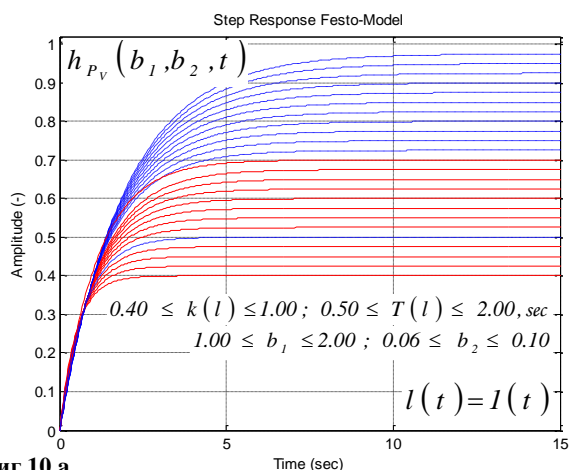
Фиг.7.



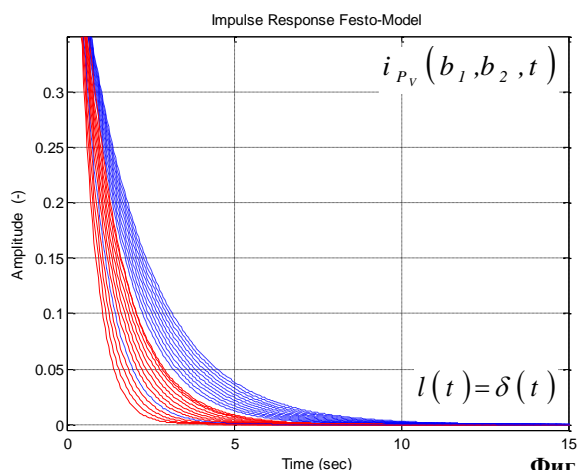
Фиг.8.



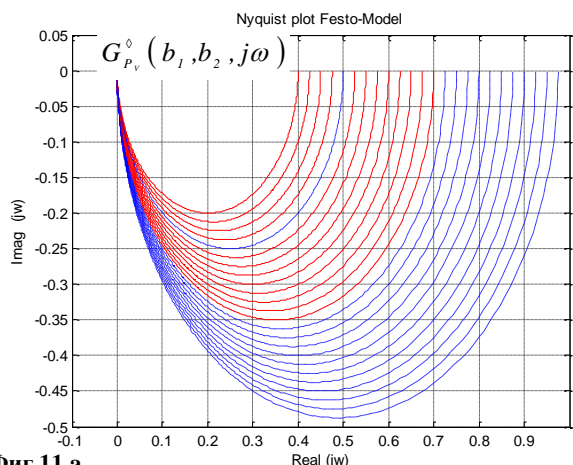
Фиг.9.



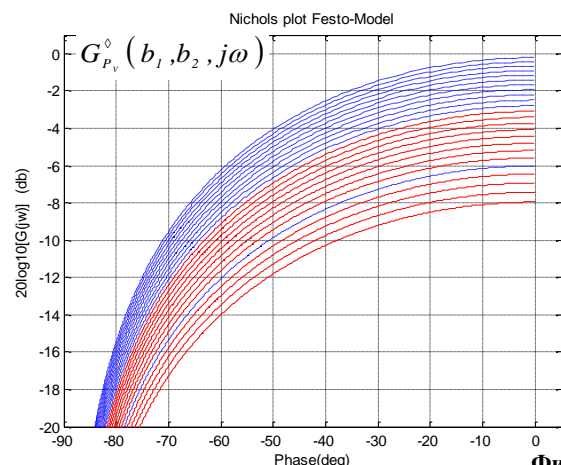
Фиг.10.a.



Фиг.10.b.



Фиг.11.a.



Фиг.11.b.

ОБОБЩАВАЩИ ИЗВОДИ ОТ РЕЗУЛТАТИТЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Изследването е насочено към разработването на аналитичен модел на лабораторен физически **FESTO**-модел на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация с използването и приложение на обобщено уравнение на газовата динамика на количеството на движение на работния флуид за: извод на аналитичното описание на динамиката на физическия модел; моделиране, симулиране и изследване на характеристиките на физическия модел като обект за управление.

Новото и оригинално, представено в работата, се определя с това, че:

- е предложено аналитично и структурно описание на процесите в лабораторния физически **FESTO**-модел, което се характеризира със: **структурна зависимост по входната променлива l и по изходната променлива P_V** , нестационарно диференциално уравнение (16), нестационарна предавателната функция (17);
- е приложен аналитичен метод, използващ за основа на изводите **базовото диференциално уравнение на газовата динамика** (9), за описанието на нестационарния режим на функциониране на технологична система с линейни елементи, работеща със свиваем флуид (въздух) в линеен ламинарен режим на „еднофазна течност“;
- е разработено аналитично описание, моделирано за конкретни реални стойности на константите и диапазоните на променливите, а резултатите от симулацията са представени в **2D-мерен параметричен плот**;
- е параметризирана, анализирана и илюстрирана **структурната зависимост на динамичните параметри на**

предложения аналитичен модел по входната променлива l и по изходната променлива P_V ;

- са анализирани реалните диапазони на промяна на стойностите на динамичните параметри на модела (предавателен коефициент и времекопстанта), определени от налягането на типичната нестационарност, въз основа на времевите и честотните характеристики;
- е разработен аналитичен модел на физическата лабораторна **FESTO**-пневматична система като обект за управление, за който входната физическа величина е позицията l на дроселиращата система на РО, а изходната величина е налягането в P_V на работния свиваем флуид в акумулаторния буфер с обем V , като налягането P_V е захранващо към следващи пневматични технологични консуматори;
- е предоставена с настоящото изследване възможност, която позволява позицията l технически да бъде регулиращата величина към такъв обект, за който регулируемата величина да бъде налягането P_V чрез включването на автоматичен регулатор, т.е. възможност за управление (стабилизация) на налягането в акумулаторния буфер на физическата лабораторна **FESTO**-пневматична система.

В тази първа част на разработката са представени резултатите от моделирането и анализа на характеристиките на процесите в **FESTO**-модела. Втората част, която е неразделна от разработката, обхваща синтеза на системите за управление на **FESTO**-модела, анализа на тяхното качество и литературата.