

УДК 62.533

DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-2-11-17

Галушко И.Д.,
Макарьянц Г.М.Самарский национальный
исследовательский университет
имени С.П. Королева
ул. Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086
neeva2804@gmail.com
georgy.makaryants@gmail.com**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
МУСКУЛОВ**

На сегодняшний день широкое применение имеет такой вид привода как пневматические мускулы. Пневматический мускул является приводом одностороннего действия и обладает такими преимуществами как развиваемое усилие, а также быстроедействие. Пневматические мускулы по сравнению с пневматическими цилиндрами имеют нелинейную структуру, которая нуждается в корректной идентификации. В данной работе исследуются динамические процессы изменения давления в рабочей полости пневматического мускула с целью построения математической модели, которая впоследствии может быть использована для разработки систем управления, где основным исполнительным элементом является пневматический мускул, а также для точного описания и прогнозирования геометрических параметров пневматических мускулов от величины давления сжатого воздуха в рабочей полости.

Ключевые слова: Пневматический мускул; динамика; экспериментальная установка; идентификация; аппроксимация; верификация; математическая модель

1 Введение

Для обеспечения качественной работы системы автоматического управления (САУ), основным исполнительным элементом которой является такой вид привода как пневматический мускул, необходима математическая модель его динамических процессов. В ранее произведённых исследованиях [1,2] были выявлены статические характеристики в виде функциональных зависимостей, описывающих относительное сокращение, а также диаметрально расширенное пневматического мускула в зависимости от величины подаваемого в рабочую полость давления. В работе [3] производилось выявление нелинейной характеристики пневматических мускулов методом параметрического возбуждения, в работах [4,5] производилось исследование характеристик пневматических мускулов при работе в конфигурации противоположной пары, такой параметр как жёсткость, а также фундаментальные зависимости, определённые для пневматического мускула с двумя степенями

свободы рассмотрены в работе [6]. Однако данные исследования не раскрывают полную математическую модель, описывающую динамику сокращения пневматического мускула с учётом таких параметров как величина развиваемого усилия, а также перемещение в зависимости от входного давления [7].

Для того, чтобы получить полную линеаризованную математическую модель пневматических мускулов, необходимо знать развиваемое приводом усилие, которое зависит непосредственно от величины рабочего давления, а также от площади поперечного сечения. Зная развиваемое усилие, можно осуществить переход к математической модели, достаточно полно описывающей динамический процесс сокращения пневматического мускула [7, 8]. Таким образом, для разработки полной математической модели привода необходимо точно описать динамический процесс изменения давления в его рабочей полости.

2 Предположения и методика решения

В работах [6,9,10], были представлены динамические процессы изменения давления в рабочих полостях пневматических мускулов при величинах входного давления 0,6 МПа. В настоящей работе предполагается, что динамический процесс изменения давления в рабочей полости рассматриваемого привода можно описать типовым апериодическим звеном первого порядка, временная реализация которого имеет вид (1), а передаточная функция равна (2):

$$P(t) = k \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \right], \quad (1)$$

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1}, \quad (2)$$

где k -коэффициент усиления, а T - постоянная времени переходного процесса.

Также в работе предполагается, что коэффициент усиления k и постоянная времени переходного процесса T являются функциями от величины выходного давления привода. Тогда предполагаемая математическая модель будет иметь вид (рисунок 1):

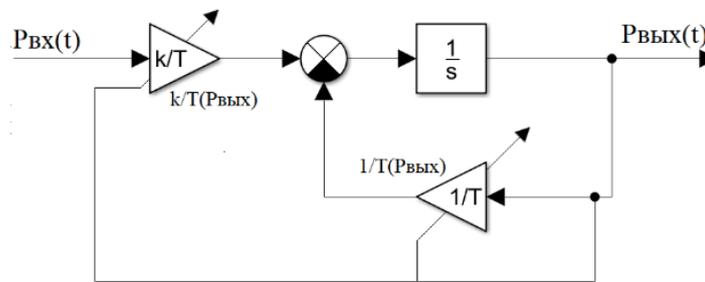


Рисунок 1. Вид предполагаемой математической модели

3 Эксперимент

Для выявления и дальнейшей идентификации динамических процессов изменения давления в рабочей полости пневматического мускула была изготовлена экспериментальная установка, представленная на рисунке 2. Данные с

датчика давления поступали на модуль ввода NI 9203, расположенный на ПЛИС NI DAQ, соединённый с ПК посредством Ethernet-кабеля. Обработка и запись данных о динамических процессах изменения давления в рабочей полости пневматического мускула производилась с помощью программного пакета NI LabView.

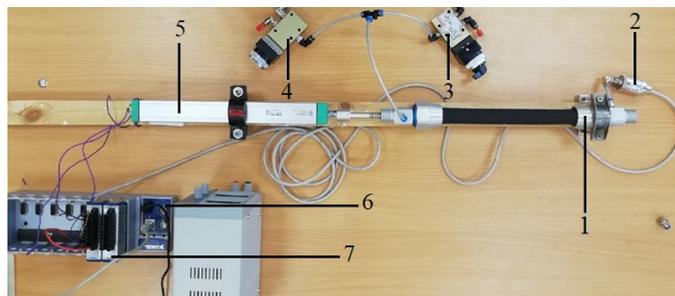


Рисунок 2. Экспериментальная установка

1-исследуемый пневматический мускул, 2-датчик давления SMC PSE560, 3 и 4- пневматические распределители ПР1 и ПР2 соответственно, 5-штоковый датчик перемещения, 6-модуль сбора данных NI DAQ, 7-модуль ввода NI 9203

Пневматическая экспериментальной

схема установки,

представленная на рисунке 3, включает в себя источник сжатого воздуха КМ, блок

подготовки, который состоит из фильтра Ф, редукционного клапана КР1 и манометра МН1, редукционного клапана КР2, манометра МН2, двух пневматических распределителей ПР1 и ПР2, исследуемого пневматического мускула ПМ и датчика давления, регистрирующего динамический процесс изменения давления в рабочей полости пневматического мускула. Редукционные клапаны КР1 и КР2 настраиваются таким образом, чтобы в напорной линии пневматического мускула ПМ создавался постоянный перепад давления равный 0,1 МПа в интервале от 0 до 0,6 МПа, то есть, первый эксперимент проводится при настроенных редукционных клапанах КР1 и КР2 на давление 0,1 МПа, при втором эксперименте клапаны настраиваются на давление 0,1 и 0,2 МПа соответственно и т.д.

Таким образом, было произведено шесть независимых экспериментов, в результате чего, посредством датчика давления, были зарегистрированы переходные процессы изменения давления в рабочей полости исследуемого пневматического мускула ПМ.

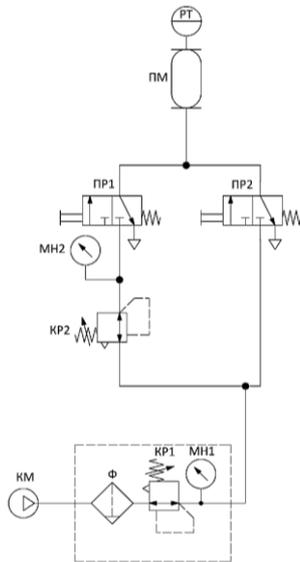


Рисунок 3. Пневматическая схема

4 Аппроксимация экспериментальных данных

Как говорилось ранее, в данной работе предполагается, что полученные

динамические процессы изменения давления в рабочей полости пневматического мускула могут быть аппроксимированы функцией временной реализации апериодического типового звена первого порядка. Изначально для каждого из шести переходных процессов, полученных экспериментально, были определены коэффициент усиления k и постоянная времени T , после чего были выведены функции временной реализации для апериодического типового звена первого порядка, после чего результаты аппроксимации были верифицированы. Верификация полученных математических зависимостей выходного давления от времени с соответствующими им средними ошибками аппроксимации представлены на рисунке 4.

В результате произведённой аппроксимации были получены передаточные функции для каждого интервала и сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Полученные передаточные функции

Интервал	Передаточная функция
0...0,1 МПа	$W(s) = \frac{1,27}{0,110s + 1}$
0,1...0,2 МПа	$W(s) = \frac{1,18}{0,109s + 1}$
0,2...0,3 МПа	$W(s) = \frac{1,08}{0,106s + 1}$
0,3...0,4 МПа	$W(s) = \frac{1,005}{0,074s + 1}$
0,4...0,5 МПа	$W(s) = \frac{1,039}{0,064s + 1}$
0,5...0,6 МПа	$W(s) = \frac{1,036}{0,057s + 1}$

Как видно из полученных передаточных функций, коэффициент усиления k и постоянная времени T , действительно имеют функциональную зависимость от величины выходного давления пневматического мускула.

Причём функция, описывающая зависимость постоянной времени T от величины выходного давления является монотонно убывающей.

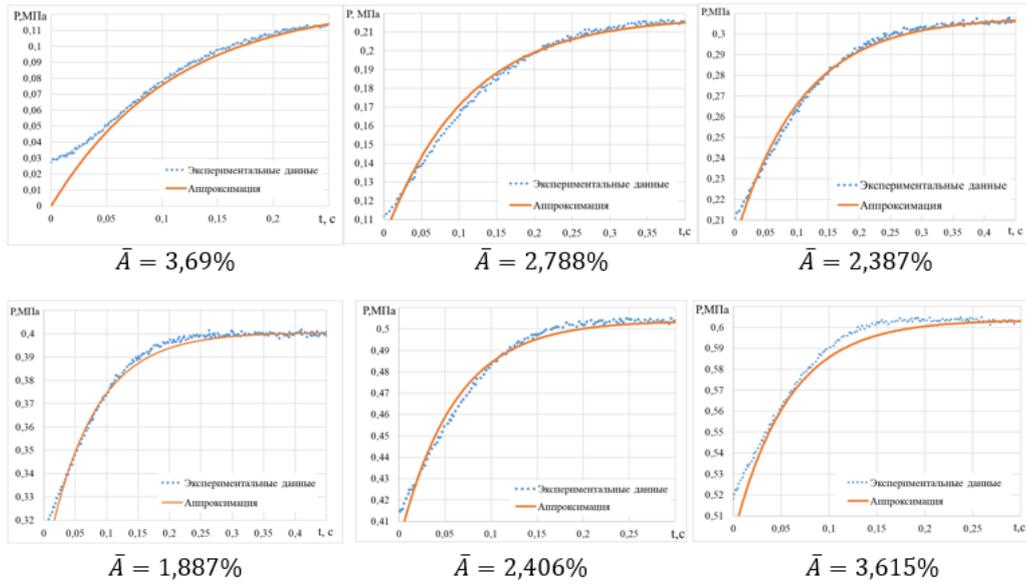


Рисунок 4. Результаты аппроксимации экспериментальных данных

5. Построение математической модели

Построение математической модели производилось в программном пакете Matlab Simulink. Полученная математическая модель представлена на рисунке 5. В блоках

Lookup Table указывались значения функциональных зависимостей отношения коэффициента усиления k к постоянной времени T , а также самой постоянной времени T от величины выходного давления $P_{\text{вых}}$, как показано на рисунке 6.

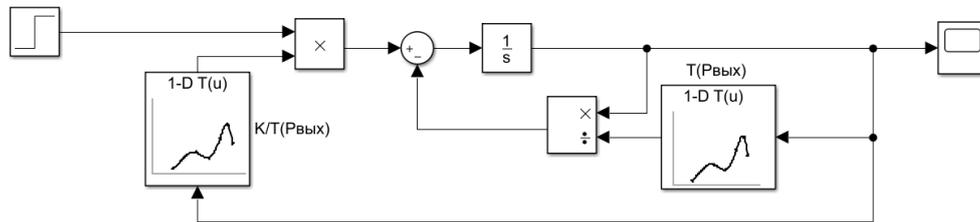


Рисунок 5. Математическая модель пневматического мускула в Matlab Simulink

Lookup Table Parameters		
$\frac{k}{T} = f(P_{\text{вых}})$		
Breakpoints	Column	(1)
Row		--
(1)	1	11.545
(2)	2	10.826
(3)	3	10.189
(4)	4	13.581
(5)	5	16.234
(6)	6	18.175

Lookup Table Parameters		
$\frac{1}{T} = f(P_{\text{вых}})$		
Breakpoints	Column	(1)
Row		--
(1)	1	0.11
(2)	2	0.109
(3)	3	0.106
(4)	4	0.074
(5)	5	0.064
(6)	6	0.057

Рисунок 6. Настройка блоков Lookup Table

6. Верификация полученной математической модели

После построения математической модели была произведена её верификация.

Результаты моделирования были сопоставлены с данными, полученными экспериментально. Стоит отметить, что результаты моделирования отличны от результатов произведенной аппроксимации

динамических процессов изменения давления в рабочей полости пневматического мускула, что связано с заданием в блоках Lookup Table кубического алгоритма интерполяции и экстраполяции зависимостей отношения коэффициента

усиления k к постоянной времени T , а также самой постоянной времени T от величины выходного давления $P_{вых}$. Результаты верификации на каждом интервале с соответствующими средними ошибками представлены на рисунке 7.

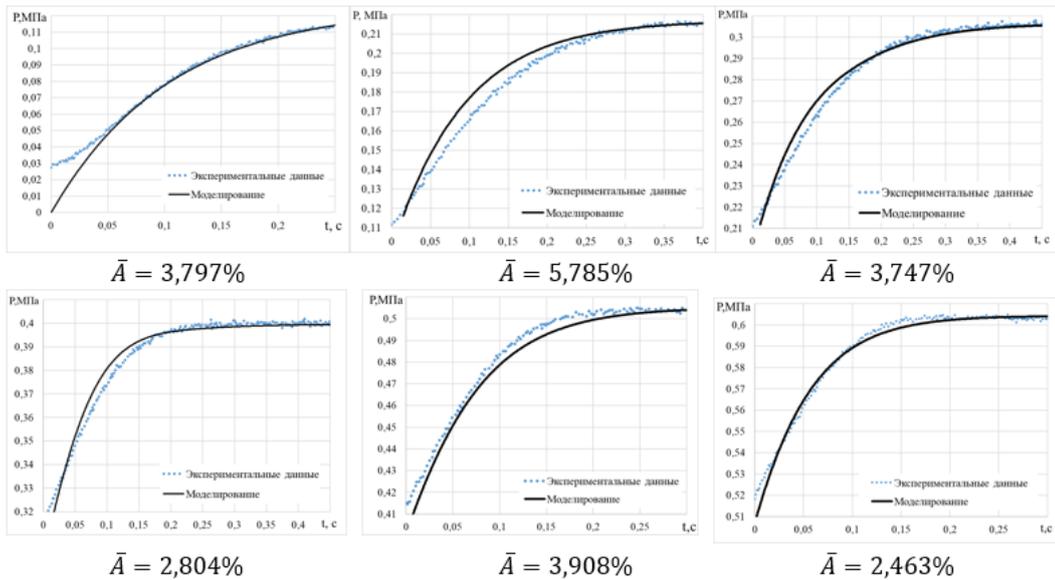


Рисунок 7. Верификация полученной математической модели

Как можно увидеть, полученная математическая модель обеспечивает допустимую точность, однако это распространяется лишь на те случаи, в которых на вход математической модели подается сигнал небольшой величины, соответствующий давлению в рабочей полости пневматического мускула величиной порядка 0,1 МПа. При подаче на

вход математической модели сигнала, соответствующего максимальному давлению в рабочей полости пневматического мускула, наблюдается значительное расхождение данных моделирования и реальных данных, полученных экспериментально. В этом случае средняя ошибка составила 37,5%. Данные верификации представлены на рисунке 8.

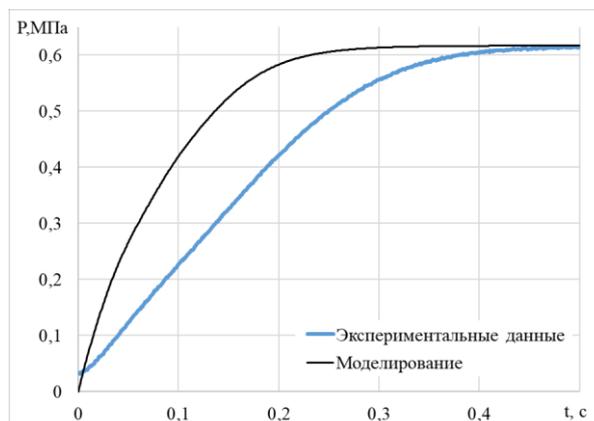


Рисунок 8. Контрольная верификация полученной математической модели

7. Заключение

1. Построена математическая модель пневматического мускула. Средняя ошибка при моделировании составила 5,785%. Полученная математическая модель пневматического мускула обеспечивает допустимую точность лишь при подаче на вход давления низкого уровня.

2. При подаче на вход давления высокого уровня наблюдается большое отклонение данных моделирования от реальных данных, полученных экспериментально, что предположительно связано с проявлением интегрирующих свойств объекта исследования. Средняя ошибка составила 37,5%.

3. Для построения полной математической модели, обеспечивающей достаточную точность при любых величинах входного давления в интервале от 0 до 0,6 МПа, необходимо иметь большую базу экспериментальных данных, а также более совершенные подходы к моделированию, которые позволят обеспечить переменную структуру передаточной функции пневматического мускула, как объекта моделирования.

8 Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 1.7914.2017/8.9, 0777-2017-000 4).

Список использованных источников

- [1] Galushko I. D. Experimental test bench for investigation of flow control around unmanned underwater robot / I. D. Galushko, S. A. Gafurov, V. A. Salmina, etc. // IFAC-PapersOnLine. – 2018. - Vol. 51, № 30. - P. 604-609.
- [2] Galushko I. D. Approach of Flow Control Around Unmanned Underwater Robot / I. D. Galushko, S. A. Gafurov, V. A. Salmina, etc. // IFAC-PapersOnLine. - 2018. - Vol. 51, № 30. - P. 452-457.
- [3] Bhaben K. Nonlinear dynamics of a parametrically excited pneumatic artificial muscle (PAM) actuator with simultaneous resonance condition / K. Bhaben, S. K. Dwivedy // Mechanism and Machine Theory. - 2019. - Vol. 135. - P. 281-297.
- [4] Chan C. Y. Characterization of pneumatic artificial muscle system in an opposing pair configuration / C. Y. Chan, S. H. Chong, M. H. Tan, T. F. Tang, K. Sato // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. - 2016. - Vol. 8. - P. 73-77.
- [5] Chen Y. C. Neural network fuzzy sliding mode control of pneumatic muscle actuators / Y. C. Chen, C. J. Chiang // Engineering Applications of Artificial Intelligence. - 2017. - Vol. 65. - P. 68-86.
- [6] Biro I. Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion / I. Biro, L. Cveticanin, J. Nemeth, J. Sarosi // Mechanism and Machine Theory. - 2015. - Vol. 85. - P. 25-34.
- [7] Doumit M. D. Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle / M. D. Doumit, S. Pardoel // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2017. - Vol. 91. - P. 93-110.
- [8] Wang S. High-precision motion control of a stage with pneumatic artificial muscles / S. Wang, K. Sato // Precision Engineering. - 2016. - Vol. 43. - P. 448-461.
- [9] Guerra Tsuzuki M. D. S., Horikawa O., Scaff W. Pneumatic Artificial Muscle Optimal Control with Simulated Annealing / M.D.S. Guerra Tsuzuki, O. Horikawa, W. Scaff // IFAC-PapersOnLine. - 2018. - Vol. 51, № 30. - P. 333-338.
- [10] Leephakpreeda T. Empirical modeling of dynamic behaviors of pneumatic artificial muscle actuators / T. Leephakpreeda, K. C. Wickramatunge // ISA Transactions. - 2013. - Vol. 52, № 6. - P. 825-834.

MATHEMATICAL MODELING OF CHANGES IN GEOMETRIC PARAMETERS OF PNEUMATIC MUSCLES

**П'я D. Galushko,
Georgiy M. Makaryants**

Samara National Research University
Moskovskoe Shosse,34
Samara, 443086
neeva2804@gmail.com
georgiy.makaryants@gmail.com

Today, this type of drive as pneumatic muscles has wide application. Pneumatic muscle is a one-way drive and has such advantages as the developed force, as well as speed. Pneumatic muscles, compared to pneumatic cylinders, have a non-linear structure that needs to be correctly identified. In this paper, we study the dynamic processes of pressure change in the working cavity of a pneumatic muscle in order to build a mathematical model, which can later be used to develop control systems, where the main actuator is pneumatic muscle, as well as to accurately describe and predict the geometric parameters of pneumatic muscles on pressure of compressed air in the working cavity.

Key words: *Pneumatic muscle; dynamics; experimental setup; identification; approximation; verification; mathematical model*

References

- [1] Galushko, I.D., Gafurov, S.A. and Salmina, V.A., et. al. (2018), "Experimental test bench for investigation of flow control around unmanned underwater robot", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 604-609.
- [2] Galushko, I.D., Gafurov, S.A. and Salmina, V.A., etc. (2018), "Approach of Flow Control Around Unmanned Underwater Robot", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 452-457.
- [3] Bhaben, K. and Dwivedy, S. K. (2019), "Nonlinear dynamics of a parametrically excited pneumatic artificial muscle (PAM) actuator with simultaneous resonance condition", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 135, pp. 281-297.
- [4] Chan, C.Y., Chong, S.H., Tan, M.H., Tang, T.F. and Sato, K. (2016), "Characterization of pneumatic artificial muscle system in an opposing pair configuration", *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 8, pp. 73-77.
- [5] Chen, Y.C. and Chiang, C.J. (2017), "Neural network fuzzy sliding mode control of pneumatic muscle actuators", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 65, pp. 68-86.
- [6] Biro, I., Cveticanin, L., Nemeth, J. and Sarosi, J. (2015), "Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 85, pp. 25-34.
- [7] Doumit, M.D. and Pardoel, S. (2017), "Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 91, pp. 93-110.
- [8] Wang, S. and Sato, K. (2016), "High-precision motion control of a stage with pneumatic artificial muscles", *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 448-461.
- [9] Guerra Tsuzuki M.D.S., Horikawa O. and Scaff W. (2018), "Pneumatic Artificial Muscle Optimal Control with Simulated Annealing", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 333-338.
- [10] Leephakpreeda T. and Wickramatunge K.C. (2013), "Empirical modeling of dynamic behaviors of pneumatic artificial muscle actuators", *ISA Transactions*, vol. 52, no. 6, pp. 825-834.