

УДК 681.53

**Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ПРОЦЕСС ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

Контуры управления технологическими параметрами могут использовать различное оборудование при технической реализации. При настройке регуляторов данных систем и их моделировании необходимо брать во внимание как линейные, так и нелинейные свойства объектов. При использовании в системах управления электрических приводов для перемещения регулирующего органа необходимо брать во внимание наличие существенных нелинейностей, которые могут сильно влиять на процесс, в том числе и при идентификации.

Для оценки влияния нелинейных свойств электрических приводов исполнительных механизмов проведено имитационное моделирование при различных параметрах объекта и нелинейных свойствах привода. Скорость перемещения исполнительного механизма была фиксированной, в то время как динамика объекта управления второго порядка менялась таким образом, чтобы он был либо быстрее, либо медленнее исполнительного механизма. Кроме этого, варьировалось соотношение между постоянными времени объекта управления. Поскольку объект имеет нелинейные характеристики, то идентификация выполнялась при нескольких вариантах сигнала задания.

Идентификация проводилась путем минимизации среднеквадратического отклонения между исходной кривой разгона нелинейного объекта и передаточной функцией второго и третьего порядков. Анализ результатов аппроксимации показал, что нелинейные свойства исполнительного механизма оказывают существенное влияние на процесс идентификации динамических свойств, пока постоянная времени объекта не становится много больше динамики исполнительного механизма. Рациональный порядок передаточной функции аппроксимации объекта управления также определяется соотношением между динамикой исполнительного механизма и динамикой объекта управления. Для линеаризации нелинейных свойств исполнительного механизма стоит вводить в передаточную функцию звено запаздывания.

**Ключевые слова:** идентификация, нелинейная динамика, электрический механизм постоянной скорости.

**Для цитирования:** Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. Влияние параметров электрических исполнительных механизмов на процесс идентификации динамики объекта управления // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 80–86.

**D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova**  
Belarusian State Technological University

### **INFLUENCE OF ELECTRICAL ACTUATOR PARAMETERS ON THE PROCESS OF IDENTIFICATION OF THE CONTROL OBJECT DYNAMICS**

The process variable control loops can use various equipment for technical implementation. When tuning the controllers of these systems and their modeling, both linear and non-linear properties of objects should be taken into account. When using electric actuator in control systems to move the valve, one should take into account the presence of significant non-linearities that can greatly affect the process, including identification.

To assess the influence of non-linear properties of electric drives of actuators, simulation modeling for various parameters of the object and non-linear properties of the drive was carried out. The speed of movement of the actuator was fixed, while the dynamics of the second order control object was changed in such a way that it was either faster or slower than the actuator. In addition, the ratio between the time response of the control object varied. Since the object has non-linear characteristics, the identification was performed with several variants of the reference signal.

The identification was carried out by minimizing the root-mean-square deviation between the initial acceleration curve of the nonlinear object and the transfer function of the second and third orders. An analysis of the approximation results showed that the nonlinear properties of the actuator have a significant impact on the process of identifying the dynamic properties until time response of the

object becomes much greater than the dynamics of the actuator. The rational order of the transfer function of the approximation of the control object is also determined by the relationship between the dynamics of the actuator and the dynamics of the control object. To linearize the nonlinear properties of the actuator, it is worth introducing a delay link into the transfer function.

**Key words:** identification, non-linear dynamics, constant speed electrical mechanism.

**For citation:** Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Influence of electrical actuator parameters on the process of identification of the control object dynamics dynamics. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics*, 202, no. 2 (260), pp. 80–86 (In Russian).

**Введение.** Несмотря на развитие частотных инверторов, которые позволили регулировать материальные потоки в технологических процессах, управляя частотой оборотов двигателей насосов, компрессоров и другим актуальным оборудованием, построение систем управления с использованием регулирования материальных и тепловых потоков с помощью клапанов по-прежнему занимает высокий процент применения. Для управления регулирующими клапанами используют различные приводы. Для непосредственного перемещения и позиционирования штока используется энергия сжатого воздуха, жидкости или электродвигателя через механические передачи [1]. На производстве чаще всего можно встретить пневматические и электрические приводы. Статические и динамические характеристики приводов влияют на качество регулирования технологических параметров.

Результаты наблюдений за работой производственного процесса часто показывают, что изменение свойств регулирующих клапанов является самой частой причиной плохого функционирования контура управления и дестабилизации технологического процесса [2–4].

Идеальной ситуацией для построения систем регулирования являются линейные характеристики приводов, которые могут быть учтены в процессе настройки замкнутых и разомкнутых систем. Однако в той или иной степени нелинейными свойствами характеризуются все приводы. Меньше всего проявляются нелинейные свойства у пневматических исполнительных механизмов, что вместе с их низкой стоимостью и высокой точностью при использовании позиционера предопределило использование их на больших и средних промышленных предприятиях. За счет технического развития точность электрических приводов практически сравнялась, однако нелинейные свойства продолжают проявляться и влиять на качество регулирования. При этом нелинейные свойства этих устройств могут существенно отличаться ввиду развития силовой электроники, изменения подходов к управлению процессом пуска и остановки двигателей. Конструкции двигателей претер-

певают изменения. При реализации исполнительных устройств могут использоваться новые типы двигателей, например такие, как вентильные. Применение микропроцессоров в схемах управления двигателями исполнительных механизмов позволяет отказаться от типичного прямого пуска и реализовать различные кривые разгоны.

Одной из проблем, на которую может повлиять нелинейные свойства исполнительного механизма, является идентификация динамических характеристик каналов управления [5–11].

**Методика исследования.** Целью исследования является оценка влияния типовых нелинейных параметров электрических исполнительных механизмов на процесс идентификации.

Для решения задачи была создана математическая модель объекта второго порядка (рис. 1) с наиболее существенной нелинейной характеристикой электрического привода клапана – трехпозиционного релейного элемента управления включением двигателя (рис. 2). Структура на рис. 1 не учитывает динамическую характеристику и особенности работы схемы управления двигателями, а также динамику механической передачи между валом двигателя и непосредственно положением штока  $S$ .

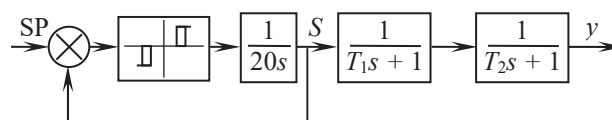


Рис. 1. Структура системы

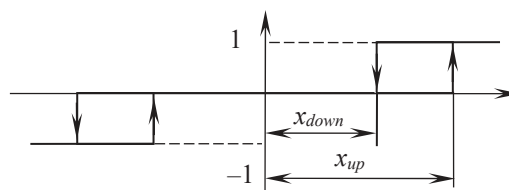


Рис. 2. Статическая характеристика трехпозиционного элемента управления клапаном

При исследовании менялись следующие характеристики:

$$- T_1 = [1 \ 2 \ 4 \ 6 \ 10 \ 18 \ 54 \ 162 \ 486];$$

$$- k_T = T_2 / T_1 [1 \ 1,3 \ 3 \ 10];$$

$$- SP = [0,33 \ 1 \ 3 \ 10];$$

$$- k_x = x_{down} / x_{down0} [1,3 \ 1 \ 0,5 \ 0,1],$$

где  $x_{down0} = 0,015$ .

Трехпозиционный элемент обладал симметричной характеристикой. Значение  $x_{up}$  имело при моделировании фиксированное значение 0,02, однако изменение значения SP позволяло проследить влияние данного параметра на процесс идентификации.

При идентификации использовался метод аппроксимации при минимизации среднеквадратичного отклонения путем вариации постоянными времени в шаблонах заданных передаточных функций [12, 13]. В качестве таких шаблонов применялись два варианта:

$$W_1(s) = \frac{k}{(T_1 0s + 1)(T_2 0s + 1)}; \quad (1)$$

$$W_2(s) = \frac{k}{(T_1 0s + 1)(T_2 0s + 1)(20s + 1)}. \quad (2)$$

В последней формуле фиксированное значение 20 появилось для учета динамики исполнительного устройства.

**Результаты и обсуждение.** Некоторые результаты исследований представлены в табл. 1–12. Табл. 2–4, табл. 6–8 и табл. 10–12 отражают отношение исходного значения  $k$  полученному. В каждую таблицу сведены одновременно и результаты аппроксимации по шаблону выражений (1) и (2), что имеет соответствующую пометку.

Таблица 1  
Ошибка аппроксимации при  $SP = 1$  и  $k_x = 1$

$T_1$	$k_T$							
	1(1)	1(2)	1,3(1)	1,3(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	0,1270	1,4588	0,1353	1,3970	0,1731	1,1226	0,1406	0,3876
2	0,1878	1,1578	0,2039	1,0939	0,2246	0,7461	0,0679	0,0157
4	0,2720	0,8195	0,2801	0,7186	0,2116	0,2384	0,0352	0,0288
6	0,2974	0,5290	0,2933	0,4183	0,1698	0,0496	0,0250	0,0235
10	0,2827	0,1860	0,2631	0,1155	0,1054	0,0121	0,0154	0,0092
18	0,2197	0,0143	0,1937	0,0081	0,0491	0,0045	0,0085	0,0013
54	0,0983	0,0073	0,0778	0,0077	0,0194	0,0071	0,0036	0,0024
162	0,0450	0,0194	0,0328	0,0185	0,0159	0,0132	0,0035	0,0041
486	0,0436	0,0320	0,0348	0,0380	0,0321	0,0329	0,0098	0,0069

Первые четыре таблицы отражают влияние соотношения между постоянными времени при фиксированных значениях сигнала за-

дания и параметрах нелинейности. Табл. 5–8 фиксируют влияние параметров нелинейности на процесс идентификации, а последняя серия таблиц отражает влияние сигнала задания на параметры передаточных функций (1) и (2). В последнем случае происходит фактическое изменение параметров нелинейного элемента.

Таблица 2  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_1$  при  $SP = 1$  и  $k_x = 1$

$T_1$	$k_T$							
	1(1)	1(2)	1,3(1)	1,3(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	6,0967	0,0000	6,3087	0,0000	7,1731	0,0000	10,548	2,0851
2	3,5322	0,0000	3,7138	0,0000	4,5832	0,5747	7,7286	2,9213
4	2,3064	0,3020	2,4422	0,4162	3,2810	1,0025	3,8735	0,2781
6	1,8640	0,4391	1,9716	0,5621	2,8286	1,1711	3,3468	0,0139
10	1,5069	0,5780	1,6686	0,6898	2,4186	0,7186	2,1598	0,2572
18	1,2852	0,6745	1,4125	0,6305	2,1917	0,5154	1,6683	0,4801
54	1,0694	0,5484	1,2370	0,6244	1,2897	0,7486	1,1866	0,8115
162	1,0329	0,7234	1,1751	0,8205	1,0772	0,9141	1,0942	0,9342
486	1,0071	0,8159	1,0741	0,8840	1,0117	0,9857	0,9892	0,9459

Таблица 3  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_2$  при  $SP = 1$  и  $k_x = 1$

$T_1$	$k_T$							
	1(1)	1(2)	1,3(1)	1,3(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	6,3086	0,0000	4,8848	0,0000	2,4134	0,0000	1,0584	0,2095
2	3,6655	0,0000	2,9001	0,0000	1,5372	0,1936	0,8096	0,3047
4	2,3072	0,3030	1,8990	0,3212	1,0949	0,3463	0,9401	0,7811
6	1,8674	0,4639	1,5923	0,4327	0,9499	0,4083	0,9050	0,9073
10	1,5334	0,5809	1,2850	0,5545	0,8418	0,7327	0,9761	0,9587
18	1,2931	0,7530	1,1252	0,8324	0,7623	0,9642	0,9789	0,9960
54	1,1150	1,2773	0,9638	1,1584	0,9520	1,0293	0,9979	0,9971
162	1,0331	1,2174	0,9050	1,0923	0,9954	1,0065	0,9931	1,0030
486	1,0077	1,1738	0,9488	1,0725	1,0013	0,9953	1,0074	1,0074

Таблица 4  
Отношение аппроксимированного коэффициента усиления объекта к исходному при  $SP = 1$  и  $k_x = 1$

$T_1$	$k_T$							
	1(1)	1(2)	1,3(1)	1,3(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	0,9877	0,9952	0,9852	0,9972	0,9880	0,9959	0,9854	0,9900
2	0,9857	0,9931	0,9855	0,9948	0,9880	0,9914	0,9866	0,9843
4	0,9883	0,9908	0,9883	0,9906	0,9880	0,9900	0,9837	0,9821
6	0,9861	0,9900	0,9883	0,9900	0,9878	0,9852	0,9846	0,9837
10	0,9880	0,9866	0,9880	0,9883	0,9849	0,9854	0,9854	0,9827
18	0,9878	0,9865	0,9878	0,9838	0,9836	0,9836	0,9837	0,9856
54	0,9847	0,9862	0,9866	0,9862	0,9836	0,9864	0,9853	0,9838
162	0,9865	0,9838	0,9839	0,9838	0,9862	0,9838	0,9837	0,9862
486	0,9838	0,9862	0,9838	0,9838	0,9838	0,9836	0,9861	0,9861

Таблица 5  
Ошибка аппроксимации при  $SP = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	$k_x$							
	1,3(1)	1,3(2)	1(1)	1(2)	0,5(1)	0,5(2)	0,1(1)	0,1(2)
1	0,1702	1,1189	0,1731	1,1226	0,1761	1,1272	0,1781	1,1309
2	0,2213	0,7428	0,2246	0,7461	0,2297	0,7514	0,2330	0,7569
4	0,2078	0,2366	0,2116	0,2384	0,2174	0,2420	0,2209	0,2443
6	0,1667	0,0480	0,1698	0,0496	0,1745	0,0506	0,1785	0,0509
10	0,1028	0,0123	0,1054	0,0121	0,1087	0,0129	0,1132	0,0133
18	0,0478	0,0043	0,0491	0,0045	0,0503	0,0044	0,0515	0,0044
54	0,0194	0,0073	0,0194	0,0071	0,0199	0,0065	0,0202	0,0069
162	0,0127	0,0130	0,0159	0,0132	0,0127	0,0122	0,0140	0,0130
486	0,0248	0,0281	0,0321	0,0329	0,0191	0,0217	0,0289	0,0331

Таблица 6  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_1$  при  $SP = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	$k_x$							
	1,3(1)	1,3(2)	1(1)	1(2)	0,5(1)	0,5(2)	0,1(1)	0,1(2)
1	7,1680	0,0000	7,1731	0,0000	7,1731	0,0000	7,2194	0,0000
2	4,5761	0,5495	4,5832	0,5747	4,6170	0,5996	4,6176	0,5883
4	3,2639	0,9831	3,2810	1,0025	3,2296	0,9982	3,2940	1,0065
6	2,7193	1,1960	2,8286	1,1711	2,8211	1,1801	2,7193	1,1960
10	2,4660	0,7337	2,4186	0,7186	2,4633	0,8153	2,2749	0,7958
18	2,1917	0,5035	2,1917	0,5154	2,2109	0,5268	2,2181	0,5179
54	1,2745	0,7390	1,2897	0,7486	1,2906	0,7537	1,2906	0,7312
162	1,0741	0,8937	1,0772	0,9141	1,0831	0,9275	1,0804	0,9125
486	1,0151	0,9506	1,0117	0,9857	1,0438	0,9750	1,0143	0,9491

Таблица 7  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_2$  при  $SP = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	$k_x$							
	1,3(1)	1,3(2)	1(1)	1(2)	0,5(1)	0,5(2)	0,1(1)	0,1(2)
1	2,3941	0,0000	2,4134	0,0000	2,4397	0,0000	2,4365	0,0000
2	1,5277	0,1968	1,5372	0,1936	1,5392	0,1999	1,5440	0,2055
4	1,0900	0,3485	1,0949	0,3463	1,1198	0,3528	1,0982	0,3536
6	0,9777	0,4016	0,9499	0,4083	0,9499	0,4099	0,9901	0,4105
10	0,8309	0,7197	0,8418	0,7327	0,8379	0,6959	0,8995	0,7126
18	0,7623	0,9738	0,7623	0,9642	0,7609	0,9656	0,7609	0,9706
54	0,9632	1,0263	0,9520	1,0293	0,9596	1,0209	0,9597	1,0367
162	0,9908	1,0161	0,9954	1,0065	0,9878	1,0028	0,9888	1,0088
486	1,0005	1,0104	1,0013	0,9953	0,9921	0,9986	0,9996	1,0100

Графики на рис. 3–6 демонстрируют основные области различия между разгонной характеристикой и результатом аппроксимации. Нелинейные свойства электрического исполнительного механизма больше всего проявляются, когда динамика объекта более быстрая, чем непосредственно самого механизма. Влияние нелинейных свойств на коэффициент усиления меньше всего, поэтому в табл. 8 приведены не все значения.

Таблица 8  
Отношение аппроксимированного коэффициента усиления объекта к исходному при  $SP = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	$k_x$							
	1,3(1)	1,3(2)	1(1)	1(2)	0,5(1)	0,5(2)	0,1(1)	0,1(2)
1	0,9821	0,9900	0,9880	0,9959	0,9954	1,0034	1,0000	1,0093
6	0,9821	0,9821	0,9878	0,9852	0,9931	0,9929	1,0000	1,0000
10	0,9821	0,9785	0,9849	0,9854	0,9946	0,9926	1,0000	0,9967
18	0,9793	0,9814	0,9836	0,9836	0,9934	0,9934	0,9993	0,9993
162	0,9795	0,9795	0,9862	0,9838	0,9914	0,9914	0,9974	0,9974
486	0,9795	0,9795	0,9838	0,9836	0,9934	0,9914	0,9974	0,9974

Таблица 9  
Ошибка аппроксимации при  $k_x = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	SP							
	0,3(1)	0,3(2)	1(1)	1(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	0,0075	0,3450	0,1731	1,1226	2,9253	2,0678	75,223	65,72
2	0,0055	0,1611	0,2246	0,7461	3,7615	1,8337	81,12	60,78
4	0,0027	0,0286	0,2116	0,2384	5,3651	1,7762	98,71	59,54
6	0,0018	0,0011	0,1698	0,0496	6,1115	1,6192	119,7	64,24
10	0,0010	0,0011	0,1054	0,0121	6,1071	1,1716	160,8	83,31
18	0,0007	0,0002	0,0491	0,0045	4,6843	0,5775	212,0	115,3
54	0,0006	0,0019	0,0194	0,0071	1,3739	0,2291	186,3	104,4
162	0,0010	0,0023	0,0159	0,0132	0,5523	0,1453	59,70	32,08
486	0,0024	0,0032	0,0321	0,0329	0,3657	0,2690	22,64	14,09

Таблица 10  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_1$  при  $k_x = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	SP							
	0,3(1)	0,3(2)	1(1)	1(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	3,5710	0,0000	7,1731	0,0000	17,83	8,158	56,62	42,61
2	2,7926	0,0000	4,5832	0,5747	9,912	4,871	28,37	23,49
4	2,3611	0,2796	3,2810	1,0025	5,974	3,387	15,66	12,06
6	1,7854	0,5986	2,8286	1,1711	4,6371	2,9026	10,99	9,263
10	1,6837	0,0490	2,4186	0,7186	3,5800	2,4726	7,4504	6,378
18	1,2324	0,1115	2,1917	0,5154	2,8558	2,2202	4,9896	4,425
54	1,0561	0,5595	1,2897	0,7486	2,2319	1,2859	2,9020	2,695
162	1,0078	0,8550	1,0772	0,9141	1,2870	1,0820	2,2691	2,1822
486	0,9934	0,9351	1,0117	0,9857	1,0855	1,0198	1,2993	1,2680

Таблица 11  
Отношение аппроксимированной постоянной времени к исходной  $T_2$  при  $SP = 1$  и  $k_T = 3$

$T_1$	SP							
	0,3(1)	0,3(2)	1(1)	1(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	1,2394	0,0000	2,4134	0,0000	5,9764	2,7398	18,92	16,274
2	0,9328	0,0000	1,5372	0,1936	3,3287	1,7208	10,00	8,0744
4	0,7904	0,0936	1,0949	0,3463	1,9954	1,1718	5,2277	4,5597
6	0,8937	0,2258	0,9499	0,4083	1,5471	0,9908	3,7561	3,1022
10	0,8622	0,7258	0,8418	0,7327	1,1933	0,8560	2,4898	2,1268
18	0,9735	0,9843	0,7623	0,9642	0,9530	0,7593	1,6901	1,4765
54	0,9975	1,0583	0,9520	1,0293	0,7567	0,9551	1,0082	0,9414
162	1,0021	1,0137	0,9954	1,0065	0,9551	0,9942	0,7572	0,7453
486	1,0021	1,0113	1,0013	0,9953	0,9872	0,9972	0,9595	0,9597

Таблица 12  
**Отношение аппроксимированного коэффициента усиления объекта к исходному при  $k_x = 1$  и  $k_T = 3$**

$T_1$	SP							
	1(1)	1(2)	1,3(1)	1,3(2)	3(1)	3(2)	10(1)	10(2)
1	0,9561	0,9700	0,9880	0,9959	1,0004	1,0000	1,0191	1,0088
2	0,9561	0,9667	0,9880	0,9914	1,0013	0,9979	1,0173	1,0095
4	0,9535	0,9603	0,9880	0,9900	1,0019	0,9974	1,0191	1,0107
6	0,9534	0,9561	0,9878	0,9852	0,9995	0,9993	1,0200	1,0110
10	0,9554	0,9527	0,9849	0,9854	1,0012	0,9980	1,0165	1,0116
18	0,9535	0,9554	0,9836	0,9836	0,9993	0,9942	1,0142	1,0106
54	0,9535	0,9561	0,9836	0,9864	0,9960	0,9936	1,0031	1,0014
162	0,9535	0,9534	0,9862	0,9838	0,9936	0,9962	0,9974	0,9967
486	0,9535	0,9535	0,9838	0,9836	0,9938	0,9938	0,9974	0,9993

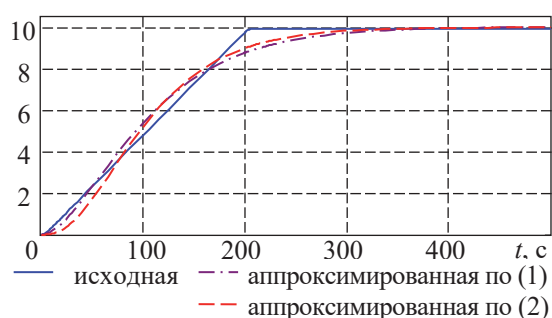


Рис. 3. Разгонные характеристики и результат аппроксимации при  $SP = 10$ ,  $T_1 = 1$ ,  $k_T = 3$  и  $k_x = 1$

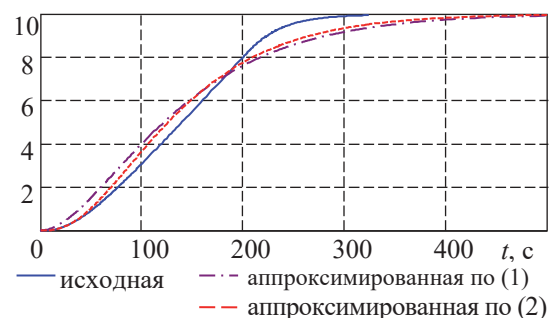


Рис. 4. Разгонные характеристики и результат аппроксимации при  $SP = 10$ ,  $T_1 = 10$ ,  $k_T = 3$  и  $k_x = 1$

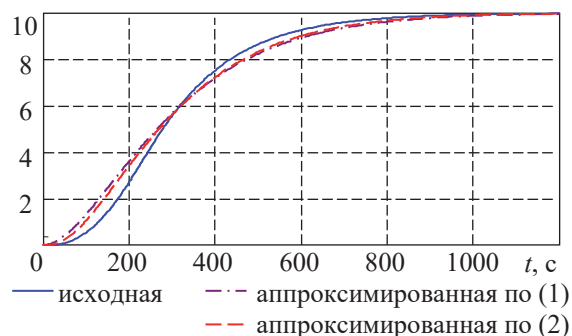


Рис. 5. Разгонные характеристики и результат аппроксимации при  $SP = 10$ ,  $T_1 = 54$ ,  $k_T = 3$  и  $k_x = 1$

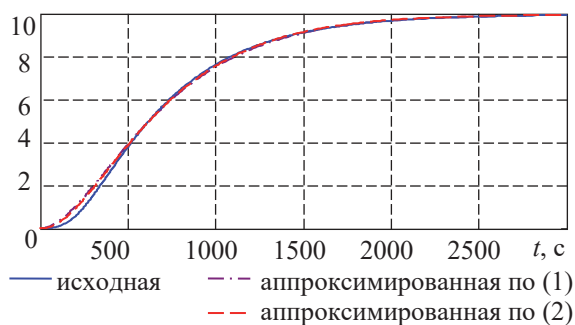


Рис. 6. Разгонные характеристики и результат аппроксимации при  $SP = 10$ ,  $T_1 = 162$ ,  $k_T = 3$  и  $k_x = 1$

Разность между исходным коэффициентом усиления и полученным имеет небольшое отличие и обусловлена влиянием численных методов и параметров нелинейности. Влияние соотношения между постоянными времени объекта на качество аппроксимации минимально. Различия между исходными и аппроксимированными параметрами больше всего наблюдаются, когда динамика объекта меньше постоянной времени исполнительного механизма.

Влияние параметров нелинейности на качество аппроксимации проявляется почти также. Однако ошибка аппроксимации при использовании шаблона (2) гораздо меньше, чем для шаблона (1). Кроме этого, незначительные изменения параметров нелинейности оказывают более существенное влияние на результат аппроксимации, чем изменение коэффициента  $k_T$ .

Выбор сигнала задания приводит к большей разнице между динамическими параметрами исходной системы и полученным результатом. При сигнале задания, увеличенном в 10 раз, только при максимальном значении постоянной времени эксперимента получено значение этих параметров, близких к исходным.

Графики 3–6 демонстрируют существенное отличие между исходной кривой и результатом аппроксимации. Основная ошибка накапливается на начальном участке и при выходе к сигналу задания. При соотношении между постоянной времени объекта и исполнительного механизма больше на порядок, основным источником ошибок является начальный участок кривой разгона. Тогда при обратном соотношении – нелинейные свойства больше проявляются на завершающем участке кривой разгона.

Увеличение параметра  $n$  в (2) повышает качество идентификации только при сравнимости динамики объекта и исполнительного механизма. При более быстром объекте управления у шаблона (1) наблюдается преимущество. Для медленных объектов введение звена

запаздывания скорее повысит качество аппроксимации, чем порядок.

**Заключение.** 1. Выбор шаблона аппроксимации для объектов управления, которые используют электрические приводы (механизмы постоянной времени), определяющим фактором является соотношение между динамикой исполнительного механизма и объекта.

2. В случае эксплуатации объекта в широком диапазоне управляющих воздействий будет проявляться различная динамика объекта при близких постоянных времени объекта и исполнительного механизма, что требует всестороннего исследования объекта управления.

3. Из-за нелинейных свойств исполнительного механизма введение звена запаздывания может повысить качество аппроксимации.

### Список литературы

1. Nesbitt B. Valves manual international: handbook of valves and actuators. Butterworth-Heinemann, 2007. 540 p.
2. Иткина Д. М. Исполнительные устройства систем управления в химической и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1984. 232 с.
3. EnTech Control Valve Dynamic Specification (Version 3.0 11/98). URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-control-valve-dynamic-specification-pss-en-67756.pdf> (accessed 25.03.2022).
4. Control Valve Dynamic Performance Specification Published on Friday 02-10-2020 <https://www.industrialautomationindia.in/articleitm/10687/Control-Valve-Dynamic-Performance-Specification/articles> (accessed 25.03.2022).
5. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 497 p.
6. Олиферович Н.М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Гармоническая идентификация технологических объектов в реальном времени // Труды БГТУ. 2016. № 6 (188): Физико-математические науки и информатика. С. 117–121.
7. Олиферович Н. М. Гринюк Д. А., Оробей И. О. Алгоритмы гармонической идентификации для технологических объектов и их апробация на тепловом объекте // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика, 2017. № 2 (200). С. 76–81.
8. Oliferovich N., Hryniuk D., I. Orobei. Harmonic identification of technological objects in real time // Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference, 2016. P. 1–4.
9. Oliferovich N., Hryniuk D., I. Orobei. The use of harmonic identification algorithms to air heat exchanger // Electrical Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference, 2017. P. 1–5.
10. Marozava M., Hryniuk D. Experimental study of the variation dynamics for air heat exchanger // Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 297–301.
11. Оценка динамики изменения температуры по длине металлического стержня / Д. А. Гринюк [и др.] // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., 27 марта 2018 г. Вологда: ВоГУ, 2018. С. 85–88.
12. Dorfman K. D., Prodromos D. Numerical Methods with Chemical Engineering Applications. Cambridge University Press, 2017. 511 p.
13. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 65–71.

### References

1. B. Nesbitt, Valves manual international: handbook of valves and actuators. Butterworth-Heinemann, 2007. 540 p.
2. Itkina D.M. *Ispolnitel'nyye ustroystva sistem upravleniya v khimicheskoy i neftekhimicheskoy promyshlennosti* [Actuators of control systems in the chemical and petrochemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 232 p. (In Russian).
3. EnTech Control Valve Dynamic Specification (Version 3.0 11/98) Available at: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-control-valve-dynamic-specification-pss-en-67756.pdf> (accessed 25.03.2022).
4. Control Valve Dynamic Performance Specification. Published on Friday 02-10-2020. Available at: <https://www.industrialautomationindia.in/articleitm/10687/Control-Valve-Dynamic-Performance-Specification/articles> (accessed 25.03.2022).

5. Mikles J., Fikar M. *Process Modelling, Identification, and Control*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 497 p.

6. Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Harmonic identification of technological objects in real time. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 117–121 (In Russian).

7. Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Harmonic identification algorithms for technological objects and their approbation on a thermal object. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 76–81 (In Russian).

8. Oliferovich N., Hryniuk D., I. Orobei. Harmonic identification of technological objects in real time. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream39242.2016.7485915.

9. Oliferovich N., Hryniuk D., I. Orobei. The use of harmonic identification algorithms to air heat exchanger. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2017. pp. 1–5. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950326.

10. Marozava M., Hryniuk D.. Experimental study of the variation dynamic's for air heat exchanger. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Science – Future of Lithuania*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 297–301.

11. Hryniuk D. A. Suhorukova I. G., Oliferovich N. M., Stabletskiy V. A. Assessment of the dynamics of temperature changes along the length of the metal rod. *Avtomatizatsiya i energosberezheniye mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstv, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniya* [Automation and energy saving of machine-building and metallurgical industries, technology and reliability of machines, instruments and equipment: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference], Vologda, 2018, pp. 85–88 (In Russian).

12. Dorfman K. D., Prodomos D. *Numerical Methods with Chemical Engineering Applications*. Cambridge University Press Publ., 2017. 511 p.

13. Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Modeling and tuning control objects with nonlinear dynamics. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2021, no. 2 (248), pp. 65–71 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

**Олиферович Надежда Михайловна** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Сухорукова Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina\_x@rambler.ru

#### Information about the authors

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

**Oliferovich Nadezhda Mikhailovna** – Assistant Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_x@rambler.ru

Поступила после доработки 15.06.2022