

Исследование возможности повышения точности обработки деталей за счет применения алгоритма управления

11, ноябрь 2012

DOI: 10.7463/1112.0483097

Лиморенко А. Д., Шачнев Ю. А.

УДК 681.08

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

LimorenkoAD@gmail.com

Современные требования к сертификации систем качества производства включают в себя необходимость разработки и внедрения статистических методов контроля. При этом регулирование технологических процессов базируется на статистических методах контроля.

В серийном и массовом производстве существует задача управления точностью обработки. В данном случае на одном и том же оборудовании, на одних и тех же режимах, то есть в условиях повторяемости, получается множество реализаций, например при обработке колец подшипников по диаметру. В результате обработки получается отклонение размера от номинального значения. Это отклонение состоит из случайной и систематической составляющих.

Естественно, что использовать для управления точностью технологического процесса полученные результаты можно, если доминирующей является систематическая составляющая с относительно небольшой скоростью ее изменения (позволяющая не проводить непрерывный контроль) [4]. Однако выделение систематической составляющей подчас является сложной процедурой и обычно при управлении такими технологическими операциями выбирают в качестве алгоритма управление по отклонению среднего, состоящее в следующем: измеряют последовательно n колец, находят среднее значение и если это среднее приближается к контрольной границе, то вводят корректировку [5].

Известны и работы по применению активного контроля для управления по текущему (скользящему) значению [1]. То есть где по результатам измерения каждой обрабатываемой детали вводится корректировка, равная по величине образовавшемуся отклонению.

Рассматриваются процессы, которые можно описать функцией вида:

$$X_i = f_i(t) + \psi_i \quad (1)$$

Здесь $f_i(t)$ - реализация отклонения на i -м шаге дискретного процесса, который содержит случайную и систематическую составляющую отклонения от некоторого принятого начала отсчета (представлена в форме последовательности). При обработке это обычно номинальный размер. В ходе исследования задавалась датчиком случайных чисел.

ψ_i - систематическая составляющая на i -м шаге дискретного процесса. Специально добавляется в ходе исследования, с целью определить возможность выявить ее (систематическую составляющую) алгоритмом управления по нескольким нижеупомянутым формулам. В данной работе рассматривается систематическая составляющая, изменяющаяся по линейному и синусоидальному законам.

X_i - отклонение на i -м шаге дискретного процесса. Является случайной составляющей отклонения от некоторого принятого начала отсчета (представлена в форме случайной последовательности).

В данной работе сделана попытка, используя методику определения скользящего значения, оценить возможности алгоритма получения и обработки измерительной информации о результатах обработки по нижепредставленным формулам.

При выборе регулирования рассматриваются следующие формулы:

$$k_1 \cdot \bar{x}; \quad (2)$$

$$k_1 \cdot \bar{x}_{i-1} + k_2 \cdot (\bar{x}_{i-1} + \bar{x}_i); \quad (3)$$

$$k_1 \cdot \bar{x}_{i-1} + k_2 \cdot (\bar{x}_{i-1} + (\bar{x}_i + k_1 \cdot \bar{x}_{i-1})); \quad (4)$$

$$k_1 \cdot (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}); \quad (5)$$

$$k_1 \cdot \bar{x}_{i-2} + k_2 \cdot (\bar{x}_{i-2} - \bar{x}_{i-1}) + k_3 \cdot (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1} - \bar{x}_{i-2}). \quad (6)$$

Здесь x_i - реализация отклонения на i -м шаге дискретного процесса, получаемая по формуле (1).

k_i - коэффициенты управления.

При вычислении первые три члена последовательности отклонений остаются неизменными, то есть $\bar{x}_1 = x_1$, $\bar{x}_2 = x_2$, $\bar{x}_3 = x_3$. А далее для каждого i -го члена последовательности отклонений будут вычисляться следующим образом:

$\bar{x}_i = x_i - (*)$, где $(*)$ – формула для вычисления управления (2)-(6), в которую вместо значений \bar{x} , \bar{x}_i , \bar{x}_{i-1} , \bar{x}_{i-2} будут подставлены соответствующие значения x_i' , x_{i-1}' , x_{i-2}' , вычисленные как среднее значение трех предыдущих членов, то есть $x_i' = \frac{x_{i-1} + x_{i-2} + x_{i-3}}{3}$ [1].

Заметим, что первая формула наиболее близка к применяемой в [5], но отличается тем, что вводится коэффициент, который позволяет учитывать прогнозное изменение среднего. В остальных формулах в качестве структурных составляющих введены изменения средних. Решение задачи состоит в выборе оптимальных в смысле указанного критерия значений k_1, k_2, k_3 и объема выборки n . При этом по техническим соображениям предпочтительным является объем выборки.

То есть каждый раз предполагается строить регулирование в соответствии с полученными результатами расчета. При этом под алгоритмом понимается определенная последовательность действий: определение объема выборки n , определение значений коэффициентов управления k_1, k_2, k_3 , процедура измерения, непрерывная процедура вычисления управления после каждой реализации по ниже представленным формулам (1)-(5) и введение самого управления. То есть практическая задача предполагает, что при анализе последовательно обработанных деталей будут определяться некоторые оптимальные значения n и k_1, k_2, k_3 , и уже при регулировании эти значения будут использоваться как параметры.

Такие или аналогичные методы контроля предложены и в стандартах группы ГОСТ Р ИСО 50779. Основными проблемами при применении этих методов являются определение объема выборки и существенное ограничение по точности технологических процессов, для которых они применимы [4]. Это ограничение определено отношением допуска к мгновенному диапазону рассеивания, которое должно быть достаточно большим, и слабым изменением систематической погрешности. Такие ограничения характерны обычно для производства деталей с невысоким требованием к точности.

Технологические процессы, используемые при производстве деталей средней и высокой точности, как правило, характеризуются неявно выраженной систематической составляющей и близкими по диапазону случайной и систематической составляющими. В этих случаях используемый алгоритм (управление по отклонению среднего) не только не дает эффект, но может приводить и к отрицательным результатам, то есть разрегулированию процесса. Поэтому ставится задача определения методики измерения эффективного объема выборки и параметров предлагаемых алгоритмов регулирования.

В качестве критерия оптимальности выбрано отношение дисперсий процессов после и до регулирования $A_{эф} = \frac{D_u}{D}$. То есть вначале производится подсчет дисперсии D процесса, в котором не вводится управление, а затем подсчет дисперсии D_u в случае, если в эту же реализацию будет введено управление. И сравнение двух этих критериев и будет говорить об эффективности. То есть в этом случае значения $A_{эф} < 1$ будут свидетельствовать о положительном эффекте регулирования, а $A_{эф} > 1$ - об отрицательном, то есть о разрегулировании процесса.

Постольку поскольку такая задача не может быть решена аналитически, то предложено исследование моделей, отражающих смешанные процессы с изменением систематической составляющей с наложенным на нее случайным дискретным процессом.

На рисунке 1 проиллюстрирован пример реализации такого процесса.

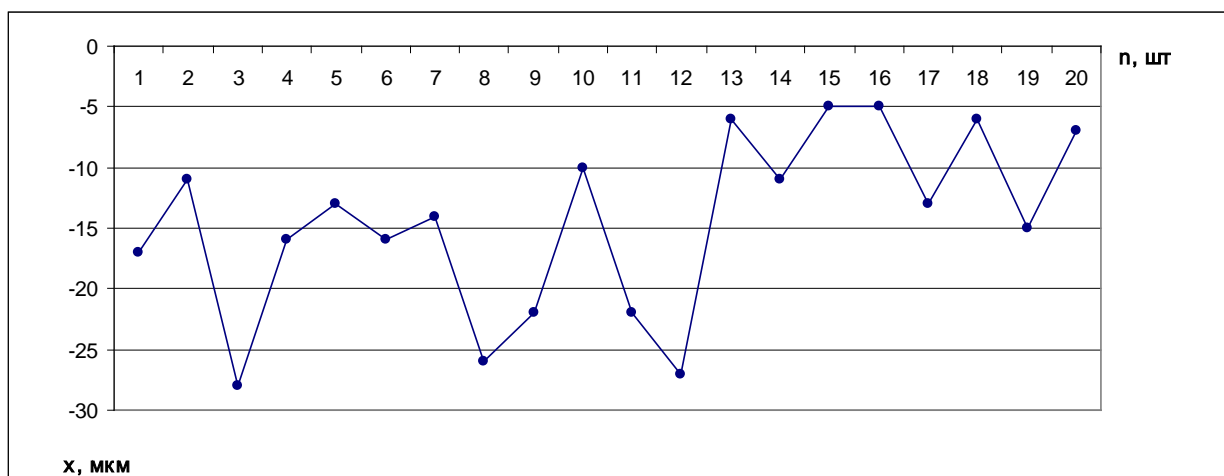


Рисунок 1. Выбранная случайная реализация смешанного процесса.

Другие реализации процесса, использованные в ходе исследования, приведены в таблице 1.

Случайные реализации смешанного процесса.

№ п/п	Массив отклонений																			
	1	-30	-20	-19	-27	-24	-24	-30	-8	0	-23	-9	-26	-15	-21	-26	-19	0	-8	-14
2	-23	-28	-24	-24	-20	-26	-28	0	-19	-11	-5	-30	-29	0	-25	-22	-12	-19	-15	-1
3	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	-28	-29	-26	-11	-22	-29	-24	-6	0	-19	-1	-21
4	-9	-14	-28	-22	-6	-20	-14	-25	-16	-30	-11	-28	-23	-25	-25	-2	-3	-29	-14	-4
5	-29	-7	-16	-29	-9	-29	-16	-10	-17	-27	-22	-24	-25	-25	-18	-15	-8	-25	-7	-2
6	-18	-15	-24	-2	-6	-6	-20	-9	-11	-25	-30	-11	-21	-24	-28	-9	-1	-1	-8	0
7	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-21	-17	-30	-25	-14	-26	-3	-28	-11	-27	-28	-30	-13
8	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	-25	-4	-14	-8
9	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	-30	-17	-25	-3	-20	-29	-5	-28	-11	-18	-4	0	-3
10	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	-23	-23	-18	-6	-3

На начальном этапе была исследована эффективность применения вышеуказанного алгоритма управления по формулам (2)-(6) для процессов, моделируемых как случайные. На рисунках 2.1-2.5 показаны примеры реализаций этих процессов и результатов их регулирования. Результаты других реализаций процесса, а также результаты регулирования, приведены в соответствующих таблицах 2.1-2.5.

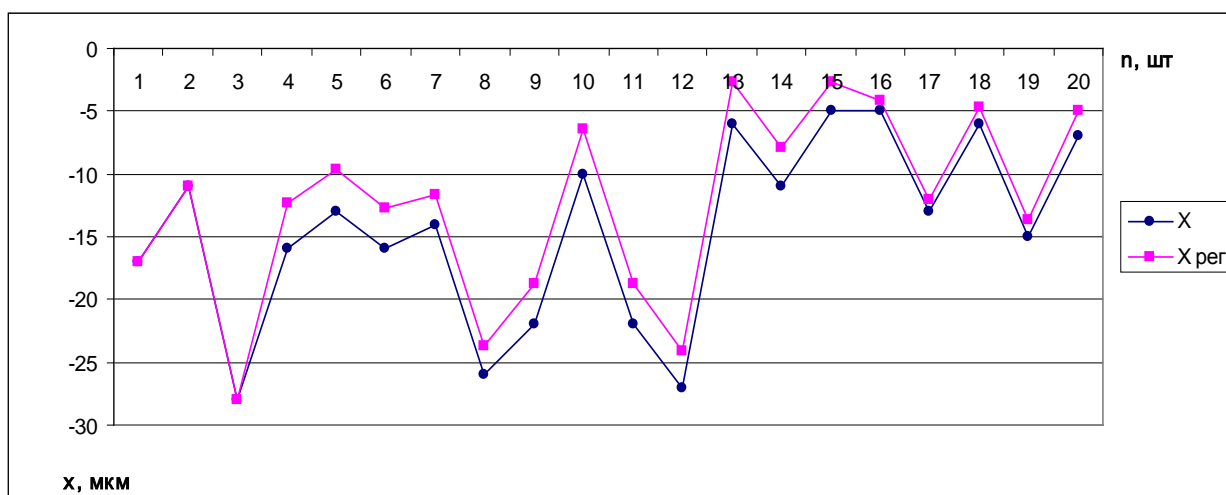


Рисунок 2.1. Пример сравнения реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле $k_1 \cdot \bar{x}$, ($A_{\phi} = 1,011526$; $n = 3$; $k_1 = 0,2$).

Сравнение реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле $k_1 \cdot \bar{x}$.

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
1	-17	-11	-28	-16	-13	-16	-14	-26	-22	-10	-22	-27	-6	-11	-5	-5	-13	-6	-15	-7	1,011526
	-17	-11	-28	12,26	9,58	12,67	11,69	23,74	18,79	6,38	18,74	24,07	2,72	7,96	2,68	4,11	12,02	4,75	13,61	4,98	
2	-23	-28	-24	-24	-20	-26	-28	0	-19	-11	-5	-30	-29	0	-25	-22	-12	-19	-15	-1	1,024851
	-23	-28	-24	-24	-20	-26	-28	0	-19	-11	-5	26,22	25,16	23,78	21,72	18,76	8,78	16,09	12,31	1,91	
3	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	-28	-29	-26	-11	-22	-29	-24	-6	0	-19	-1	-21	0,874753
	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	9,3	10,22	5,23	6,81	10,74	16,43	7,74	9,63	11,88	12,93	5,81	17,22	
4	-9	-14	-28	-22	-6	-20	-14	-25	-16	-30	-11	-28	-23	-25	-25	-2	-3	-29	-14	-4	0,998709
	-9	-14	-28	-22	-6	16,84	10,52	21,66	12,92	27,28	7,43	24,81	19,24	21,33	20,99	1,75	0,38	26,62	11,32	1,73	
5	-29	-7	-16	-29	-9	-29	-16	-10	-17	-27	-22	-24	-25	-25	-18	-15	-8	-25	-7	-2	0,989327
	-29	-7	-16	23,8	4,32	24,58	10,73	6,04	12,86	24,04	17,71	18,54	18,97	19,47	12,31	9,92	3,82	22,39	3,38	0,96	
6	-18	-15	-24	-2	-6	-6	-20	-9	-11	-25	-30	-11	-21	-24	-28	-9	-1	-1	-8	0	0,981919
	-18	-15	-24	-2	0,09	1,89	17,21	6,88	8,39	21,56	24,59	4,85	15,06	17,39	21,81	3,08	4,73	2,74	6,25	0,18	
7	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-21	-17	-30	-25	-14	-26	-3	-28	-11	-27	-28	-30	-13	0,950013
	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-21	-17	23,95	18,91	8,18	19,81	3,57	22,56	5,31	21,08	22,07	23,85	6,85	
8	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	-25	-4	-14	-8	1,007847
	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	22,4	1,27	11,56	5,68	
9	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	-30	-17	-25	-3	-20	-29	-5	-28	-11	-18	-4	0	-3	1,000342
	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	27,22	13,85	21,97	0,25	17,03	26,29	1,71	24,92	7,98	15,15	1,34	2,69	0,86	
10	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	-23	-23	-18	-6	-3	1,017955
	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	19,77	19,89	14,92	3,06	0,39	

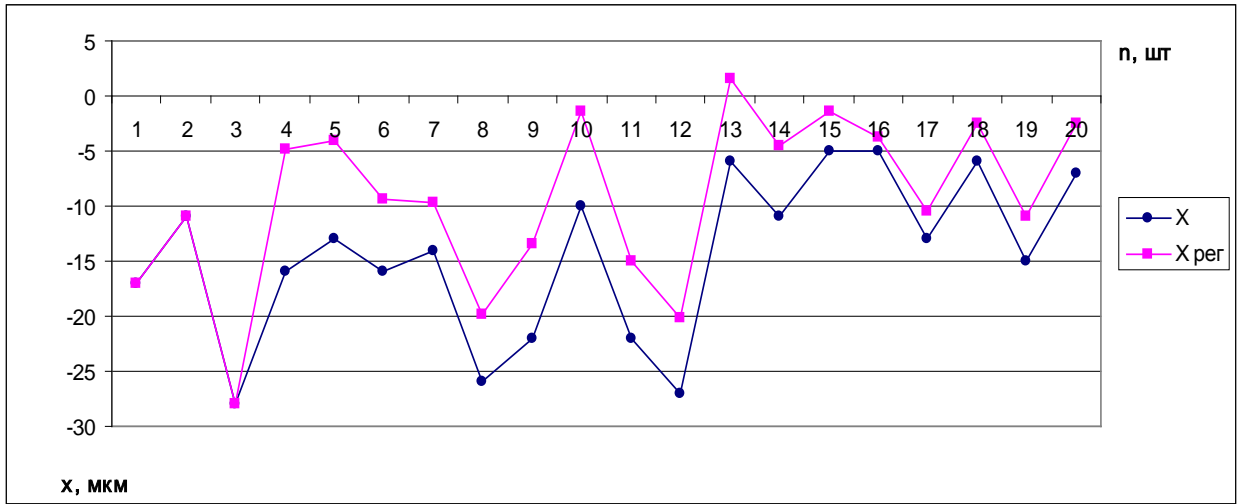


Рисунок 2.2. Пример сравнения реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле $k_1 \cdot \bar{x}_1 + k_2 \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)$, ($A_{\phi} = 1,050491$; $n = 3$; $k_1 = 0,2$; $k_2 = 0,2$).

Таблица 2.2

Сравнение реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле

$$k_1 \cdot \bar{x}_1 + k_2 \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_2).$$

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
	-17	11	28	16	13	16	14	26	22	10	22	27	-6	11	-5	-5	13	-6	15		-7
1	-17	11	28	16	13	16	14	26	22	10	22	27	-6	11	-5	-5	13	-6	15	-7	1,050491
	-17	11	28	4,8 6	4,0 9	9,4 1	9,7 2	19, 89	13, 36	1,3 8	14, 93	20, 15	1,6	4,5 6	1,3 8	3,6 8	10, 51	2,5 7	10, 89	2,4 3	
2	-23	28	24	24	20	26	28	0	19	11	-5	30	29	0	25	22	12	19	15	-1	1,084526
	-23	28	24	8,9 3	8,3 4	17, 61	19, 75	8,5 8	13, 15	6,7 2	1,8 4	24, 54	20, 89	9,3 3	17, 75	16, 06	5,6 8	11, 02	8,5 1	3,7 3	
3	-9	-3	16	17	-6	-3	10	-4	28	29	26	11	22	29	24	-6	0	19	-1	21	0,766316
	-9	-3	16	17	-6	-3	10	-4	3,0 5	4,9 3	3,7 1	4,9 8	9,9 2	14, 14	7,3 2	8,0 1	9,3 4	11, 11	6,3 7	12, 61	
4	-9	14	28	22	-6	20	14	25	16	30	11	28	23	25	25	-2	-3	29	14	-4	1,008682
	-9	14	28	22	-6	10, 08	4,3 9	16, 66	9,1 4	23, 48	3,3 1	20, 21	14, 01	15, 94	15, 71	6,2 4	3,4 6	24, 08	8,5 5	0,1 6	
5	-29	-7	16	29	-9	29	16	10	17	27	22	24	25	25	18	15	-8	25	-7	-2	0,971105
	-29	-7	16	18, 6	0,5 4	21, 11	8,1 2	3,4 2	10, 74	21, 28	13, 67	13, 97	14, 96	15, 72	8,7 9	7,1	2,1 9	20, 31	1,0 8	2,7	
6	-18	15	24	-2	-6	-6	20	-9	11	25	30	11	21	24	28	-9	-1	-1	-8	0	0,928201
	-18	15	24	-2	-6	-6	20	-9	11	2,1 7	9,6 3	5,8 1	7,3 1	9,3 3	12, 31	5,0 1	8,2 7	4,6 4	4,0 77	2,9	
7	-23	25	0	11	22	17	0	21	17	30	25	14	26	-3	28	11	27	28	30	13	0,946191
	-23	25	0	11	22	17	0	12, 65	9,7 1	22, 93	16, 43	5,5 9	18, 51	4,4 4	20, 58	3,3 1	19, 77	20, 83	22, 08	4,5 2	

8	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	-25	-4	-14	-8	1,047204
	-12	-25	-21	-13	-5	9,6	12,33	1,21	15,74	1,22	1,63	17,09	22,79	6,09	4,15	0,15	21,11	0,69	11,79	3,96	
9	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	-30	-17	-25	-3	-20	-29	-5	-28	-11	-18	-4	0	-3	0,994911
	-14	-18	-14	1,06	18,85	0,25	4,53	24,63	10,06	15,78	5,65	15,29	23,03	2,24	19,93	3,65	12,38	2,13	2,54	2,08	
10	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	-23	-23	-18	-6	-3	1,094901
	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	13,4	13,93	9,36	1,81	3,82	

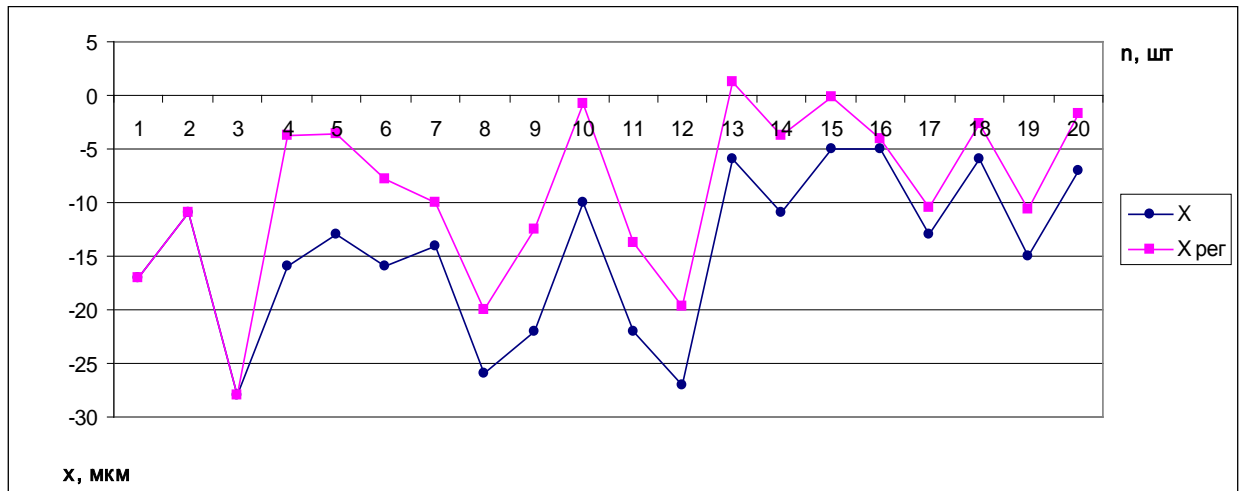


Рисунок 2.3. Пример сравнения реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле $k_1 \cdot \bar{x}_1 + k_2 \cdot (\bar{x}_1 + (\bar{x}_2 + k_1 \cdot \bar{x}_1))$, ($A_{зф} = 1,063906$; $n = 3$; $k_1 = 0,2$; $k_2 = 0,2$).

Таблица 2.3

Сравнение реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле

$$k_1 \cdot \bar{x}_1 + k_2 \cdot (\bar{x}_1 + (\bar{x}_2 + k_1 \cdot \bar{x}_1)).$$

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
1	-17	-11	-28	-16	-13	-16	-14	-26	-22	-10	-22	-27	-6	-11	-5	-5	-13	-6	-15	-7	1,063906
	-17	-11	-28	3,73	3,58	7,87	10,03	19,97	12,56	0,74	13,79	19,69	1,25	3,82	0,21	4,11	10,51	2,63	10,55	1,79	
2	-23	-28	-24	-24	-20	-26	-28	0	-19	-11	-5	-30	-29	0	-25	-22	-12	-19	-15	-1	1,077859
	-23	-28	-24	7,4	6,78	16,63	19,97	8,67	12,15	5,57	2,86	23,88	20,6	9,47	16,33	15,04	6,82	10,09	7,61	3,97	
3	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	-28	-29	-26	-11	-22	-29	-24	-6	0	-19	-1	-21	0,781541
	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	3,75	6,18	2,64	6,28	10,18	14,96	7,05	7,57	9,28	11,01	5,95	13,87	
4	-9	-14	-28	-22	-6	-20	-14	-25	-16	-30	-11	-28	-23	-25	-25	-2	-3	-29	-14	-4	1,014472
	-9	-14	-28	-22	-6	9,72	3,78	15,64	8,49	23,55	3,21	20,31	13,54	15,71	14,84	6,19	4,14	23,78	8,15	0,54	

5	-29	-7	-16	-29	-9	-29	-16	-10	-17	-27	-22	-24	-25	-25	-18	-15	-8	-25	-7	-2	0,959385
	-29	-7	-16	16,66	0,46	20,44	7,42	3,67	9,56	21,07	13,67	13,53	13,67	15,15	8,32	6,56	1,46	20,06	0,91	2,62	
6	-18	-15	-24	-2	-6	-6	-20	-9	-11	-25	-30	-11	-21	-24	-28	-9	-1	-1	-8	0	0,952324
	-18	-15	-24	-2	-6	-6	-20	-9	-11	3,32	10,54	6,18	8,41	10,03	13,01	5,76	8,56	5,44	3,93	3,54	
7	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-21	-17	-30	-25	-14	-26	-3	-28	-11	-27	-28	-30	-13	0,946856
	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-12	9,05	23,05	16,22	5,08	18,19	4,25	20,39	3,16	19,21	20,51	22,08	4,11	
8	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	-25	-4	-14	-8	1,051406
	-12	-25	-21	-13	-5	9,12	11,38	0,53	15,47	1,14	1,51	16,82	22,89	6,67	4,01	0,17	20,49	0,11	12,25	4,22	
9	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	-30	-17	-25	-3	-20	-29	-5	-28	-11	-18	-4	0	-3	0,995619
	-14	-18	-14	0,13	17,84	0,79	4,96	23,59	10,31	15,55	7,09	14,91	22,39	1,37	18,94	2,27	12,83	3,07	2,41	1,33	
10	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	-23	-23	-18	-6	-3	1,100041
	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	13,01	13,65	9,05	2,14	3,91	

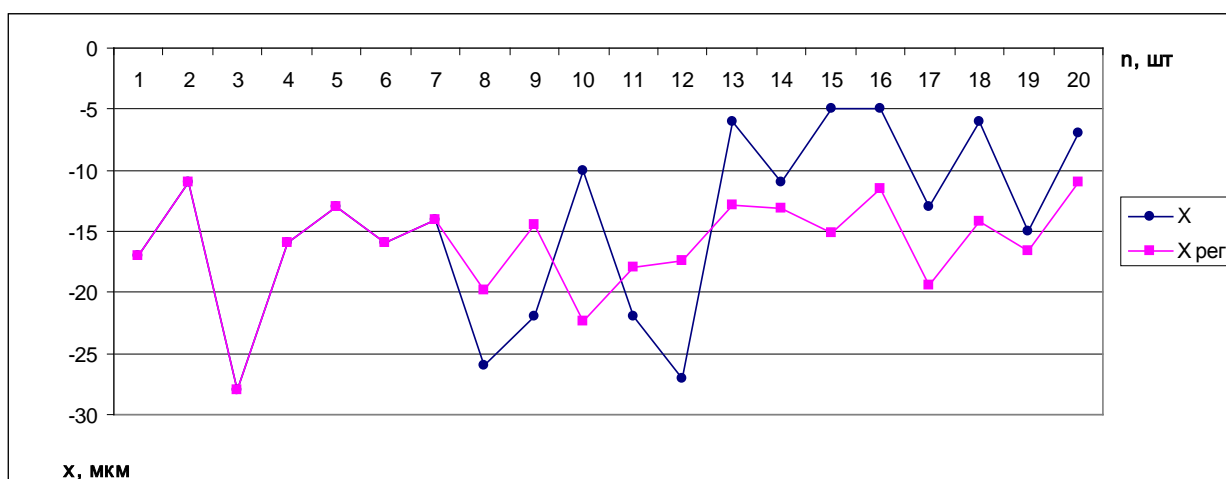


Рисунок 2.4. Пример сравнения реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле $k_1 \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)$, ($A_{эф} = 0,563662$; $n = 7$; $k_1 = 4,8$).

Таблица 2.4

Сравнение реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле

$$k_1 \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x}_1).$$

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
1	-17	-11	-28	-16	-13	-16	-14	-26	-22	-10	-22	-27	-6	-11	-5	-5	-13	-6	-15	-7	0,563662
	-17	-11	-28	-16	-13	-16	-14	19,83	14,46	22,34	17,88	17,4	12,86	13,06	15,17	11,48	19,41	14,15	16,65	11,02	

2	-23	-28	-24	-24	-20	-26	-28	0	-19	-11	-5	-30	-29	0	-25	-22	-12	-19	-15	-1	0,161217
	-23	-28	-24	23,03	27,73	24,07	23,19	26,81	23,89	22,79	26,08	24,1	22,99	25,21	24,13	22,96	24,77	23,96	22,7	23,79	
3	-9	-3	-16	-17	-6	-3	-10	-4	-28	-29	-26	-11	-22	-29	-24	-6	0	-19	-1	-21	0,420531
	-9	-3	-16	-17	8,4	-3	14,8	14,4	12,32	8,19	17,04	13,72	14,25	12,36	18,43	12,17	11,41	13,68	14,94	13,94	
4	-9	-14	-28	-22	-6	-20	-14	-25	-16	-30	-11	-28	-23	-25	-25	-2	-3	-29	-14	-4	0,612408
	-9	-14	-28	-22	8,17	15,65	24,15	22,83	10,33	19,59	20,53	24,25	13,81	21,08	21,76	18,12	10,83	23,25	19,62	14,24	
5	-29	-7	-16	-29	-9	-29	-16	-10	-17	-27	-22	-24	-25	-25	-18	-15	-8	-25	-7	-2	0,595775
	-29	-7	-16	-29	-22	14,7	-16	22,35	20,25	19,01	18,1	22,93	21,91	21,11	18,06	20,15	17,04	22,47	14,19	13,79	
6	-18	-15	-24	-2	-6	-6	-20	-9	-11	-25	-30	-11	-21	-24	-28	-9	-1	-1	-8	0	0,295922
	-18	-15	-24	15,33	13,5	21	16,11	12,75	19,33	17,59	15,62	17,94	18,16	17,02	19,62	16,63	14,35	16,51	15,19	11,95	
7	-23	-25	0	-11	-22	-17	0	-21	-17	-30	-25	-14	-26	-3	-28	-11	-27	-28	-30	-13	0,657299
	-23	-25	0	-11	-22	-17	14,18	23,46	6,51	18,28	23,15	15,85	18,71	15,62	14,75	15,49	24,62	20,51	23,04	14,62	
8	-12	-25	-21	-13	-5	-19	-21	-8	-21	-4	-6	-21	-28	0	0	-4	-25	-4	-14	-8	0,429505
	-12	-25	-21	12,16	21,66	20,66	13,63	19,38	20,72	12,03	17,15	20,76	14,69	14,29	17,31	12,91	16,08	15,08	13,09	14,73	
9	-14	-18	-14	-10	-26	-6	-9	-30	-17	-25	-3	-20	-29	-5	-28	-11	-18	-4	0	-3	0,201310
	-14	-18	14	13,86	18,26	13,73	13,71	18,65	13,84	14,08	18,13	14,04	14,57	17,69	14,51	14,45	17,71	14,16	13,97	17,21	
10	-29	-22	-25	-28	-10	-14	-13	-23	-13	-4	-8	-8	-28	-8	-9	-23	-23	-18	-6	-3	0,323225
	-29	-22	-25	-28	-29	-22	-25	-28	-29	-22	-25	-28	-29	-22	-25	-28	-29	-22	-25	-28	

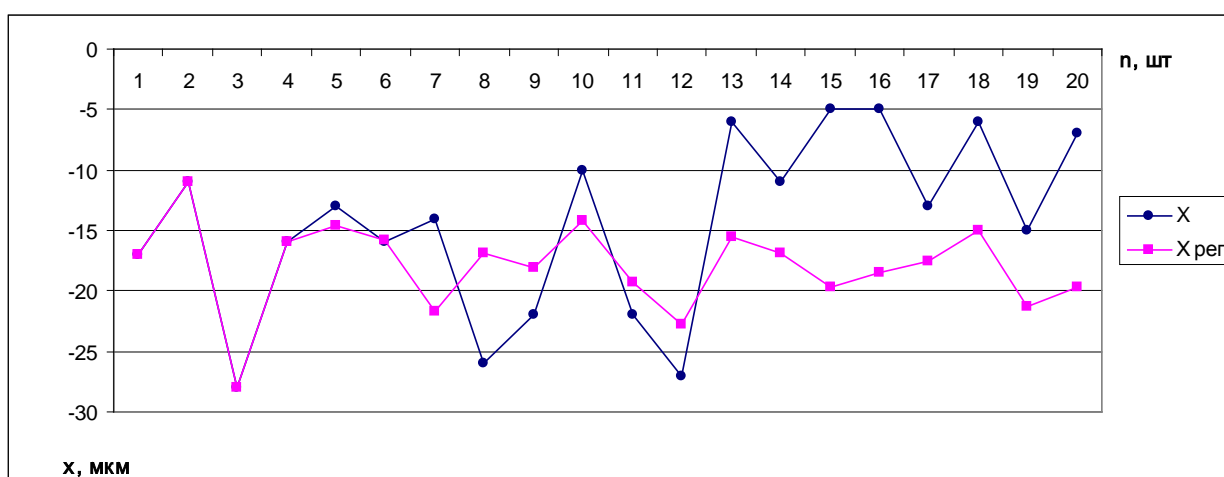


Рисунок 2.5. Пример сравнения реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по

формуле $k_1 \cdot \overline{x_{i-2}} + k_2 \cdot (\overline{x_{i-2}} - \overline{x_{i-1}}) + k_3 \cdot (\overline{x_i} - \overline{x_{i-1}} - \overline{x_{i-2}})$, ($A_{эф} = 0,499657$; $n = 4$; $k_1 = 1$;

$k_2 = 2,9$; $k_3 = 1$).

Сравнение реализации нерегулируемого процесса с регулируемым по формуле

$$k_1 \cdot \overline{x_{i-2}} + k_2 \cdot (\overline{x_{i-2}} - \overline{x_{i-1}}) + k_3 \cdot (\overline{x_i} - \overline{x_{i-1}} - \overline{x_{i-2}}).$$

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
1	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,499657
	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,167695
	-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,370253
	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,546917
	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,570381
	-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,197643
	-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,641138
	-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,314711
	-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,223877
	-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,253525
	-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Как видно из рисунков, применение вышеуказанного алгоритма управления по формулам (2), (3), (4) имеют отрицательную эффективность, то есть приводят к разрегулированию процессов; (5) и (5) уже в этих условиях можно получить существенную эффективность (уменьшение дисперсии). Это говорит о том, что в таких процессах с помощью применения алгоритма удастся выделить систематическую составляющую. Для того чтобы проанализировать влияние систематической составляющей, далее был рассмотрен случайный процесс, систематическая составляющая

которого менялась по линейному закону. Причем рассматривались различные углы наклона соответствующего графика к оси ОХ. На рисунках 3.1-3.4 показаны примеры реализаций модели, полученных при различных углах наклона графика систематической составляющей. В таблицах 3.1-3.4 приведены реализации процесса с указанной систематической составляющей.

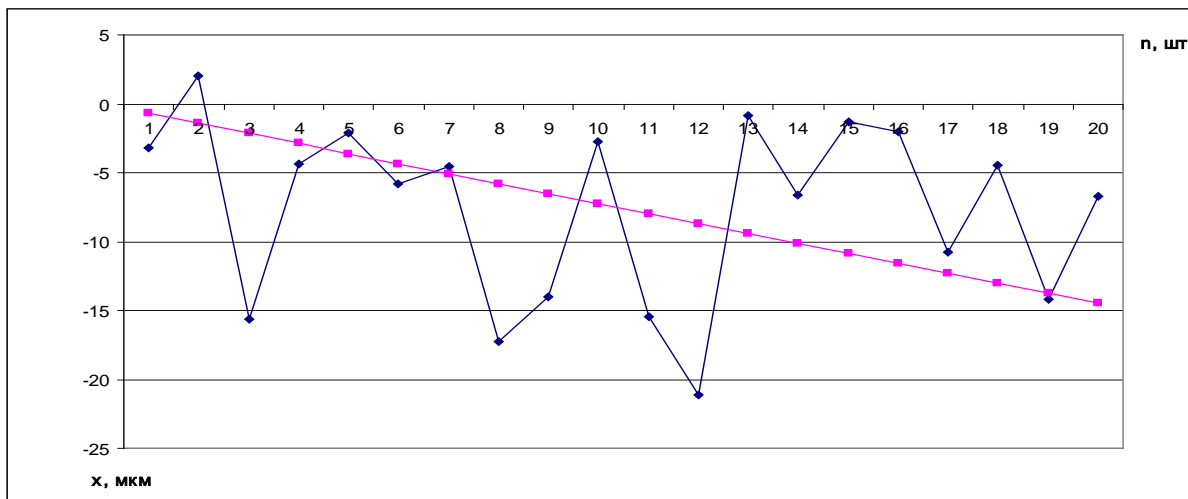


Рисунок 3.1. Пример реализации модели при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона $-7,5^\circ$.

Таблица 3.1

Реализации модели процесса при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона $-7,5^\circ$.

№ п/п	Массив отклонений																			
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	17,72	12,44	30,16	18,88	16,61	20,33	19,05	31,77	28,49	17,22	29,94	35,66	15,38	21,11	15,83	16,55	25,27	18,99	28,71	21,43
2	23,72	29,44	26,16	26,88	23,61	30,33	33,05	5,77	25,49	18,22	12,94	38,66	38,38	10,11	35,83	33,55	24,27	31,99	28,71	15,43
3	9,72	4,44	18,16	19,88	9,61	7,33	15,05	9,77	34,49	36,22	33,94	19,66	31,38	39,11	34,83	17,55	12,27	31,99	14,71	35,43
4	9,72	15,44	30,16	24,88	9,61	24,33	19,05	30,77	22,49	37,22	18,94	36,66	32,38	35,11	35,83	13,55	15,27	41,99	27,71	18,43
5	29,72	8,44	18,16	31,88	12,61	33,33	21,05	15,77	23,49	34,22	29,94	32,66	34,38	35,11	28,83	26,55	20,27	37,99	20,71	16,43
6	18,72	16,44	26,16	4,88	9,61	10,33	25,05	14,77	17,49	32,22	37,94	19,66	30,38	34,11	38,83	20,55	13,27	13,99	21,71	14,43
7	23,72	26,44	2,16	13,88	25,61	21,33	5,05	26,77	23,49	37,22	32,94	22,66	35,38	13,11	38,83	22,55	39,27	40,99	43,71	27,43
8	12,72	26,44	23,16	15,88	8,61	23,33	26,05	13,77	27,49	11,22	13,94	29,66	37,38	10,11	10,83	15,55	37,27	16,99	27,71	22,43
9	14,72	19,44	16,16	12,88	29,61	10,33	14,05	35,77	23,49	32,22	10,94	28,66	38,38	15,11	38,83	22,55	30,27	16,99	13,71	17,43
10	29,72	23,44	27,16	30,88	13,61	18,33	18,05	28,77	19,49	11,22	15,94	16,66	37,38	18,11	19,83	34,55	35,27	30,99	19,71	17,43

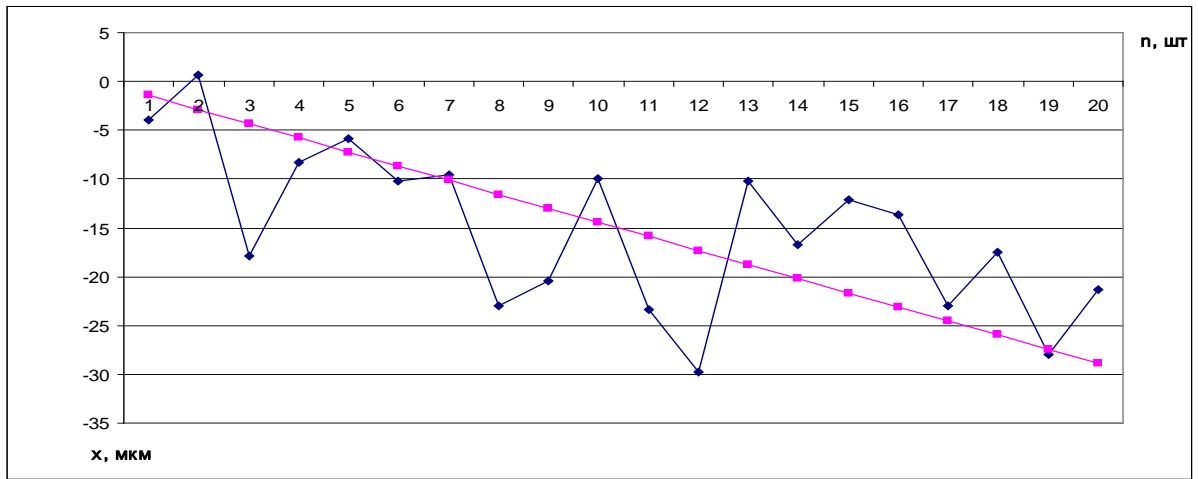


Рисунок 3.2. Пример реализации модели при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона -15° .

Таблица 3.2

Реализации модели процесса при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона -15° .

№ п/п	Массив отклонений																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	18,4 5	13,8 8	32,3 3	21, 77	20,2 2	24,6 6	24,1 1	37, 55	34,9 9	24,4 4	37,8 8	44, 32	24,7 6	31,2 1	26,6 5	28, 1	37,5 4	31,9 8	42,4 3	35,8 7
2	24,4 5	30,8 8	28,3 3	29, 77	27,2 2	34,6 6	38,1 1	11, 55	31,9 9	25,4 4	20,8 8	47, 32	47,7 6	20,2 1	46,6 5	45, 1	36,5 4	44,9 8	42,4 3	29,8 7
3	10,4 5	- 5,88	20,3 3	22, 77	13,2 2	11,6 6	20,1 1	15, 55	40,9 9	43,4 4	41,8 8	28, 32	40,7 6	49,2 1	45,6 5	29, 1	24,5 4	44,9 8	28,4 3	49,8 7
4	10,4 5	16,8 8	32,3 3	27, 77	13,2 2	28,6 6	24,1 1	36, 55	28,9 9	44,4 4	26,8 8	45, 32	41,7 6	45,2 1	46,6 5	25, 1	27,5 4	54,9 8	41,4 3	32,8 7
5	30,4 5	- 9,88	20,3 3	34, 77	16,2 2	37,6 6	26,1 1	21, 55	29,9 9	41,4 4	37,8 8	41, 32	43,7 6	45,2 1	39,6 5	38, 1	32,5 4	50,9 8	34,4 3	30,8 7
6	19,4 5	17,8 8	28,3 3	7,7 7	13,2 2	14,6 6	30,1 1	20, 55	23,9 9	39,4 4	45,8 8	28, 32	39,7 6	44,2 1	49,6 5	32, 1	25,5 4	26,9 8	35,4 3	28,8 7
7	24,4 5	27,8 8	- 4,33	16, 77	29,2 2	25,6 6	10,1 1	32, 55	29,9 9	44,4 4	40,8 8	31, 32	44,7 6	23,2 1	49,6 5	34, 1	51,5 4	53,9 8	57,4 3	41,8 7
8	13,4 5	27,8 8	25,3 3	18, 77	12,2 2	27,6 6	31,1 1	19, 55	33,9 9	18,4 4	21,8 8	38, 32	46,7 6	20,2 1	21,6 5	27, 1	49,5 4	29,9 8	41,4 3	36,8 7
9	15,4 5	20,8 8	18,3 3	15, 77	33,2 2	14,6 6	19,1 1	41, 55	29,9 9	39,4 4	18,8 8	37, 32	47,7 6	25,2 1	49,6 5	34, 1	42,5 4	29,9 8	27,4 3	31,8 7
10	30,4 5	24,8 8	29,3 3	33, 77	17,2 2	22,6 6	23,1 1	34, 55	25,9 9	18,4 4	23,8 8	25, 32	46,7 6	28,2 1	30,6 5	46, 1	47,5 4	43,9 8	33,4 3	31,8 7

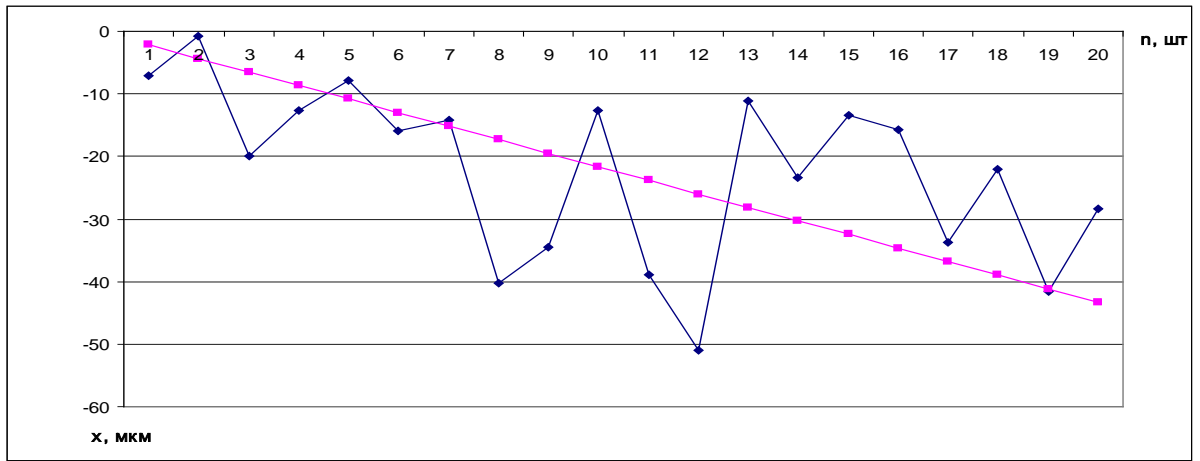


Рисунок 3.3. Пример реализации модели при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона $-22,5^\circ$.

Таблица 3.3

Реализации модели процесса при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона $-22,5^\circ$.

№ п/п	Массив отклонений																			
1	24,1 7	11,8 2	47,9 9	28, 65	20,9 4	31,9 9	28,1 6	66, 32	56,4 8	22,6 8	60,8 2	77, 98	17,0 4	34,3 2	18,4 8	20, 65	46,8 1	27,9 7	56,6 4	35,3 -
2	30,1 7	28,8 2	43,9 9	36, 65	27,9 4	41,9 9	42,1 6	40, 32	53,4 8	23,6 8	43,8 2	80, 98	40,0 4	23,3 2	38,4 8	37, 65	45,8 1	40,9 7	56,6 4	29,3 -
3	16,1 7	3,82 -	35,9 9	29, 65	13,9 4	18,9 9	24,1 6	44, 32	62,4 8	41,6 8	64,8 2	61, 98	33,0 4	52,3 2	37,4 8	21, 65	33,8 1	40,9 7	42,6 4	49,3 -
4	16,1 7	14,8 2	47,9 9	34, 65	13,9 4	35,9 9	28,1 6	65, 32	50,4 8	42,6 8	49,8 2	78, 98	34,0 4	48,3 2	38,4 8	17, 65	36,8 1	50,9 7	55,6 4	32,3 -
5	36,1 7	7,82 -	35,9 9	41, 65	16,9 4	44,9 9	30,1 6	50, 32	51,4 8	39,6 8	60,8 2	74, 98	36,0 4	48,3 2	31,4 8	30, 65	41,8 1	46,9 7	48,6 4	30,3 -
6	25,1 7	15,8 2	43,9 9	14, 65	13,9 4	21,9 9	34,1 6	49, 32	45,4 8	37,6 8	68,8 2	61, 98	32,0 4	47,3 2	41,4 8	24, 65	34,8 1	22,9 7	49,6 4	28,3 -
7	30,1 7	25,8 2	19,9 9	23, 65	29,9 4	32,9 9	14,1 6	61, 32	51,4 8	42,6 8	63,8 2	64, 98	37,0 4	26,3 2	41,4 8	26, 65	60,8 1	49,9 7	71,6 4	41,3 -
8	19,1 7	25,8 2	40,9 9	25, 65	12,9 4	34,9 9	35,1 6	48, 32	55,4 8	16,6 8	44,8 2	71, 98	39,0 4	23,3 2	13,4 8	19, 65	58,8 1	25,9 7	55,6 4	36,3 -
9	21,1 7	18,8 2	33,9 9	22, 65	33,9 4	21,9 9	23,1 6	70, 32	51,4 8	37,6 8	41,8 2	70, 98	40,0 4	28,3 2	41,4 8	26, 65	51,8 1	25,9 7	41,6 4	31,3 -
10	36,1 7	22,8 2	44,9 9	40, 65	17,9 4	29,9 9	27,1 6	63, 32	47,4 8	16,6 8	46,8 2	58, 98	39,0 4	31,3 2	22,4 8	38, 65	56,8 1	39,9 7	47,6 4	31,3 -

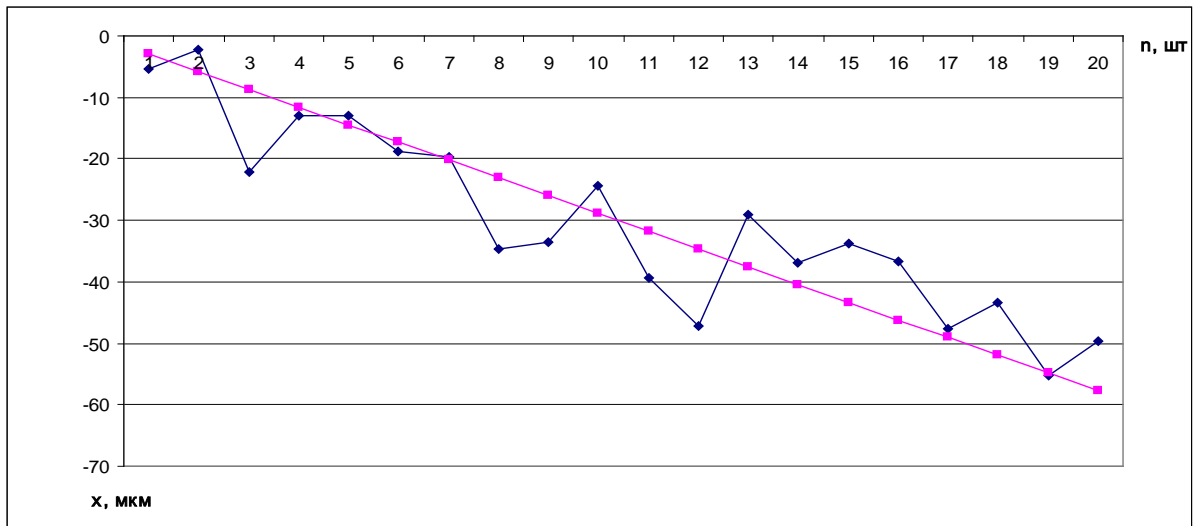


Рисунок 3.4. Пример реализации модели при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона -30° .

Таблица 3.4

Реализации модели процесса при систематической составляющей в форме прямой с углом наклона -30° .

№ п/п	Массив отклонений																			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	19,8 9	16,7 7	36,6 6	27, 55	27,4 3	33,3 2	34,2 1	49, 09	47,9 8	38,8 7	53,7 5	61, 64	43,5 3	51,4 2	- 48,3	51, 2	62,0 7	57,9 6	69,8 5	64,7 4
2	25,8 9	33,7 7	32,6 6	35, 55	34,4 3	43,3 2	48,2 1	23, 09	44,9 8	39,8 7	36,7 5	64, 64	66,5 3	40,4 2	- 68,3	68, 2	61,0 7	70,9 6	69,8 5	58,7 4
3	11,8 9	- 8,77	24,6 6	28, 55	20,4 3	20,3 2	30,2 1	27, 09	53,9 8	57,8 7	57,7 5	45, 64	59,5 3	69,4 2	- 67,3	52, 2	49,0 7	70,9 6	55,8 5	78,7 4
4	11,8 9	19,7 7	36,6 6	33, 55	20,4 3	37,3 2	34,2 1	48, 09	41,9 8	58,8 7	42,7 5	62, 64	60,5 3	65,4 2	- 68,3	48, 2	52,0 7	80,9 6	68,8 5	61,7 4
5	31,8 9	12,7 7	24,6 6	40, 55	23,4 3	46,3 2	36,2 1	33, 09	42,9 8	55,8 7	53,7 5	58, 64	62,5 3	65,4 2	- 61,3	61, 2	57,0 7	76,9 6	61,8 5	59,7 4
6	20,8 9	20,7 7	32,6 6	13, 55	20,4 3	23,3 2	40,2 1	32, 09	36,9 8	53,8 7	61,7 5	45, 64	58,5 3	64,4 2	- 71,3	55, 2	50,0 7	52,9 6	62,8 5	57,7 4
7	25,8 9	30,7 7	- 8,66	22, 55	36,4 3	34,3 2	20,2 1	44, 09	42,9 8	58,8 7	56,7 5	48, 64	63,5 3	43,4 2	- 71,3	57, 2	76,0 7	79,9 6	84,8 5	70,7 4
8	14,8 9	30,7 7	29,6 6	24, 55	19,4 3	36,3 2	41,2 1	31, 09	46,9 8	32,8 7	37,7 5	55, 64	65,5 3	40,4 2	- 43,3	50, 2	74,0 7	55,9 6	68,8 5	65,7 4
9	16,8 9	23,7 7	22,6 6	21, 55	40,4 3	23,3 2	29,2 1	53, 09	42,9 8	53,8 7	34,7 5	54, 64	66,5 3	45,4 2	- 71,3	57, 2	67,0 7	55,9 6	54,8 5	60,7 4
10	31,8 9	27,7 7	33,6 6	39, 55	24,4 3	31,3 2	33,2 1	46, 09	38,9 8	32,8 7	39,7 5	42, 64	65,5 3	48,4 2	- 52,3	69, 2	72,0 7	69,9 6	60,8 5	60,7 4

Для всех формул в целом получен определенный эффект регулирования. На графиках (рисунки 4.1-4.5) показано изменение коэффициента эффективности $A_{эф}$ в зависимости от интенсивности систематической составляющей для разных алгоритмов. И

в таблицах 4.1-4.5 приведены коэффициенты эффективности в зависимости от угла наклона прямой для каждой формулы, по которой производится управление.

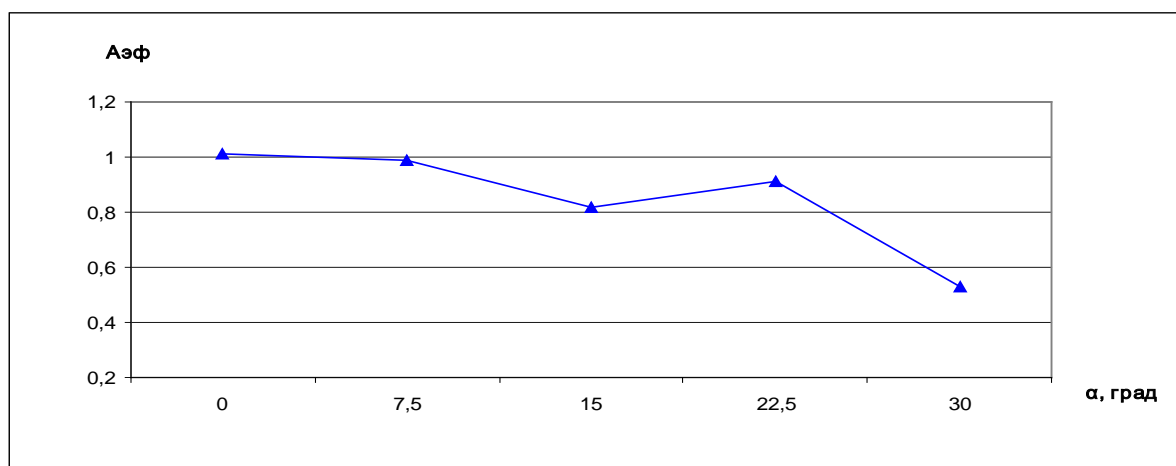


Рисунок 4.1. Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (2).

Таблица 4.1

Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (2): $k_1 \cdot \bar{x}$.

№ п/п \ Угол	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7,5°	0,963303	0,960845	0,722527	0,911885	0,900801	0,878871	0,809768	0,943105	0,891629	0,785342
15 °	0,785092	0,901824	0,769009	0,806021	0,714940	0,812689	0,755575	0,938886	0,803152	0,922646
22,5 °	0,963413	1,016630	0,791222	0,903463	0,842130	0,875379	0,843948	1,015087	0,897574	1,078762
30 °	0,634022	0,680039	0,682507	0,673521	0,605211	0,665393	0,666441	0,720102	0,654134	0,668190

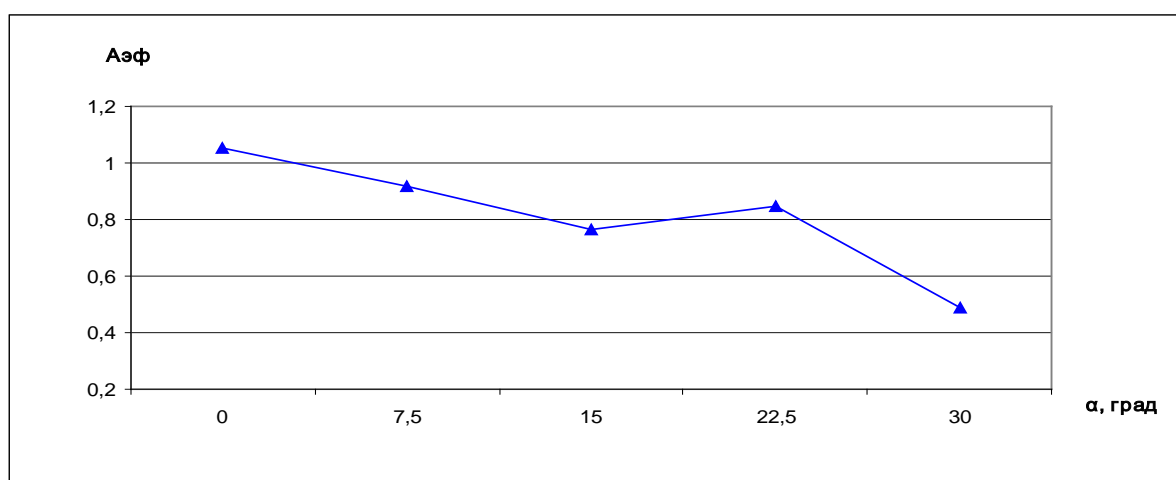


Рисунок 4.2. Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (3).

Таблица 4.2

Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (3): $k_1 \cdot \overline{x_{i-1}} + k_2 \cdot (\overline{x_{i-1}} + \overline{x_i})$.

№ п/п \ Угол	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7,5°	0,996628	1,009369	0,643313	0,903514	0,901826	0,842221	0,789052	0,952809	0,611489	1,611551
15 °	1,000591	0,967802	0,839651	0,531768	0,841691	0,426970	0,293133	0,588947	0,332949	1,343048
22,5 °	0,207646	0,428916	0,642851	0,244051	0,353758	0,232048	0,906309	0,895231	0,816523	0,540763
30 °	0,402528	0,508001	0,125710	0,298546	0,402495	0,231697	0,162375	0,306490	0,196213	0,597207

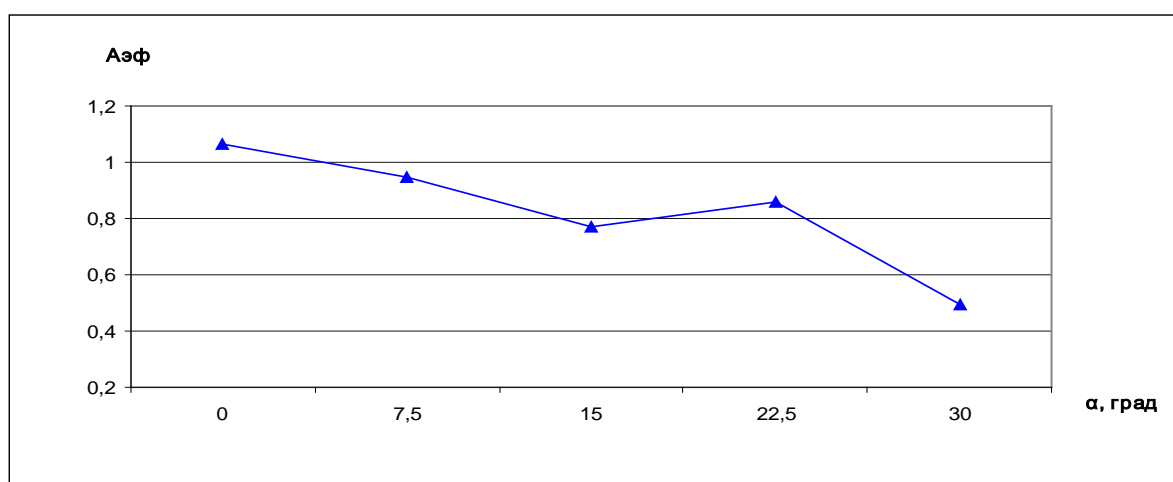


Рисунок 4.3. Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (4).

Таблица 4.3

Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (4):

$$k_1 \cdot \overline{x_{i-1}} + k_2 \cdot (\overline{x_{i-1}} + (\overline{x_i} + k_1 \cdot \overline{x_{i-1}})).$$

№ п/п \ Угол	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7,5°	1,030997	0,603591	0,286877	0,469330	0,634223	0,415554	0,385214	0,540984	0,369279	0,855575
15 °	0,945148	0,907381	0,174787	0,503601	0,798293	0,407715	0,281548	0,556151	0,313020	1,258825
22,5 °	0,368336	0,879011	0,298898	0,458197	0,667496	0,440896	0,267378	0,380802	0,333873	0,945153
30 °	0,379761	0,476136	0,119315	0,282680	0,380816	0,219803	0,154645	0,288892	0,184123	0,559597

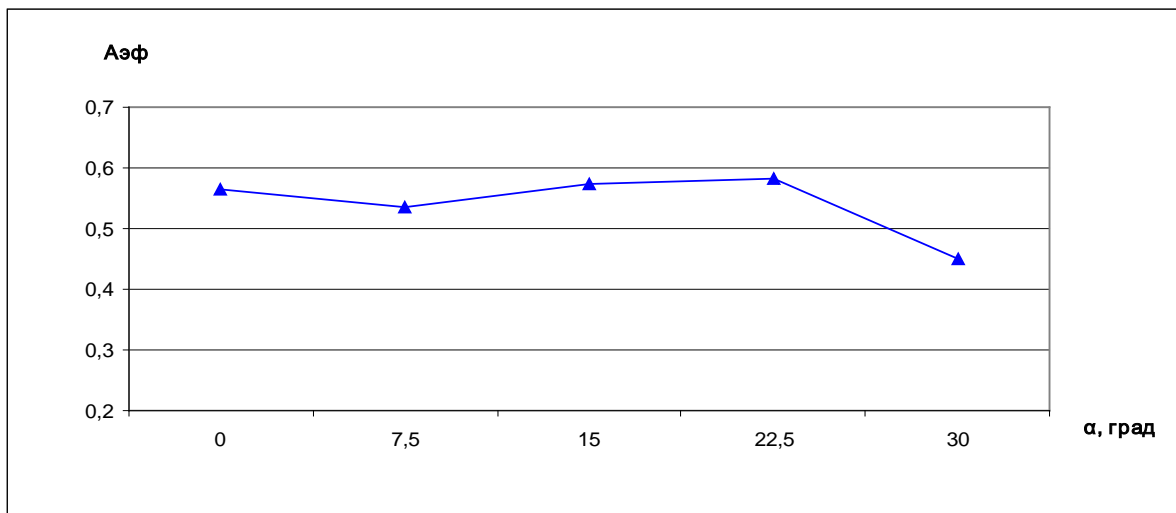


Рисунок 4.4. Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (5).

Таблица 4.4

Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (5): $k_1 \cdot (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1})$.

№ п/п \ Угол	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7,5°	0,613193	0,190258	0,452387	0,649102	0,626737	0,328299	0,611016	0,390991	0,429988	0,283676
15 °	1,304522	1,295732	0,520131	1,583356	2,025274	1,194591	0,653778	1,738672	0,980565	1,849056
22,5 °	0,525123	1,357937	0,413243	0,653422	0,961056	0,617020	0,405968	0,571204	0,506128	1,443208
30 °	1,161278	1,509541	0,363466	0,894066	1,020105	0,662936	0,388896	0,914588	0,584930	1,720701

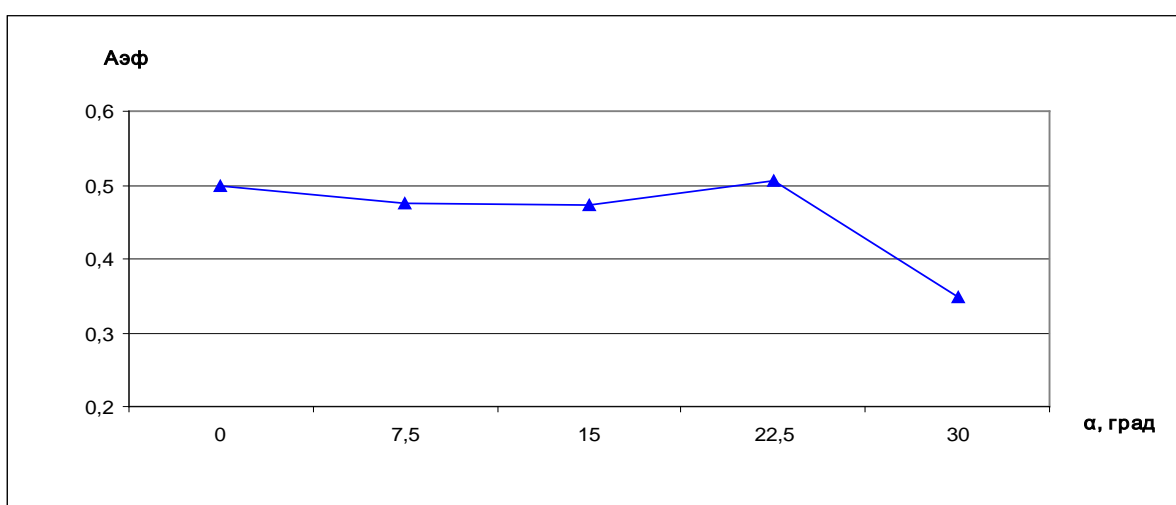


Рисунок 4.5. Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (6).

Зависимость коэффициента эффективности при изменении соотношения систематической и случайной составляющей для регулирования по формуле (5):

$$k_1 \cdot \overline{x_{i-2}} + k_2 \cdot (\overline{x_{i-2}} - \overline{x_{i-1}}) + k_3 \cdot (\overline{x_i} - \overline{x_{i-1}} - \overline{x_{i-2}}).$$

№ п/п Угол	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7,5°	0,573801	0,175129	0,344184	0,551019	0,580714	0,234022	0,531528	0,375948	0,426787	0,307363
15 °	1,273723	1,277007	0,226183	0,618967	1,002086	0,495989	0,452168	0,685625	0,691395	0,792560
22,5 °	0,481503	1,248944	0,374619	0,573937	0,858779	0,548691	0,436531	0,493348	0,590022	1,254745
30 °	1,033215	0,977958	0,271989	0,665725	0,696604	0,688726	0,374044	0,661921	0,975260	1,141108

Следует отметить, что в регулировании по формулам (2), (3) и (4) зависимость от угла наклона более существенна. Меньшая зависимость при регулировании по формулам (5) и (6) также указывает на то, что с их помощью удастся лучше выделить систематическую составляющую. Тем не менее, были проведены дополнительные исследования, в которых систематическая составляющая была представлена в форме синусоиды – рисунки 5.1-5.5 и таблицы 5.1-5.5.

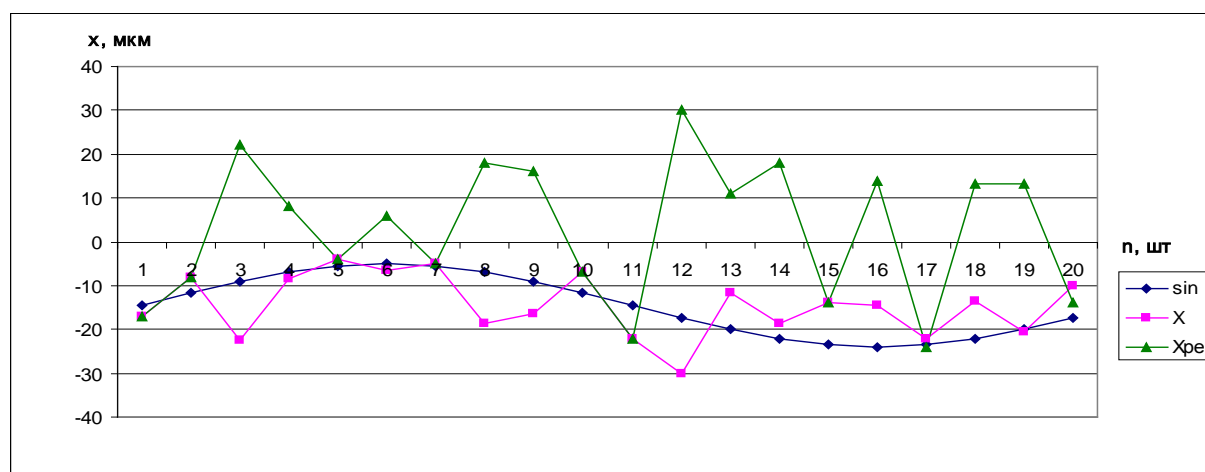


Рисунок 5.1. Исследование эффективности управления по формуле (2) при синусоидальной модели систематической составляющей, ($A_{эф} = 0,996871$; $n = 16$;

$$k_1 = 5,2).$$

Сравнение реализации регулируемого и нерегулируемого процессов при управлении по формуле (2) при синусоидальной модели систематической составляющей.

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
1	31,50	22,50	37,00	23,00	18,50	21,00	19,50	33,00	31,00	21,50	36,50	44,50	26,00	33,00	28,50	29,00	36,50	28,00	35,00	24,50	1,120007
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	37,50	39,50	33,00	31,00	25,50	31,00	33,50	7,00	28,00	22,50	19,50	47,50	49,00	22,00	48,50	46,00	35,50	41,00	35,00	18,50	1,063123
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	23,50	14,50	25,00	24,00	11,50	8,00	15,50	11,00	37,00	40,50	40,50	28,50	42,00	51,00	47,50	30,00	23,50	41,00	21,00	38,50	0,829161
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	23,50	25,50	37,00	29,00	11,50	25,00	19,50	32,00	25,00	41,50	25,50	45,50	43,00	47,00	48,50	26,00	26,50	51,00	34,00	21,50	0,941640
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	43,50	18,50	25,00	36,00	14,50	34,00	21,50	17,00	26,00	38,50	36,50	41,50	45,00	47,00	41,50	39,00	31,50	47,00	27,00	19,50	0,889718
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,50	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	0,954983
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	22,00	5,50	28,00	26,00	41,50	39,50	31,50	46,00	25,00	51,50	35,00	50,50	50,00	50,00	30,50	0,854310
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	26,50	36,50	30,00	20,00	10,50	24,00	26,50	15,00	30,00	15,50	20,50	38,50	48,00	22,00	23,50	28,00	48,50	26,00	34,00	25,50	1,133974
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	28,50	29,50	23,00	17,00	31,50	11,00	14,50	37,00	26,00	36,50	17,50	37,50	49,00	27,00	51,50	35,00	41,50	26,00	20,00	20,50	0,954827
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	19,00	18,50	30,00	22,00	15,50	22,50	25,50	48,00	30,00	32,50	47,00	46,50	40,00	26,00	20,50	1,104070
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

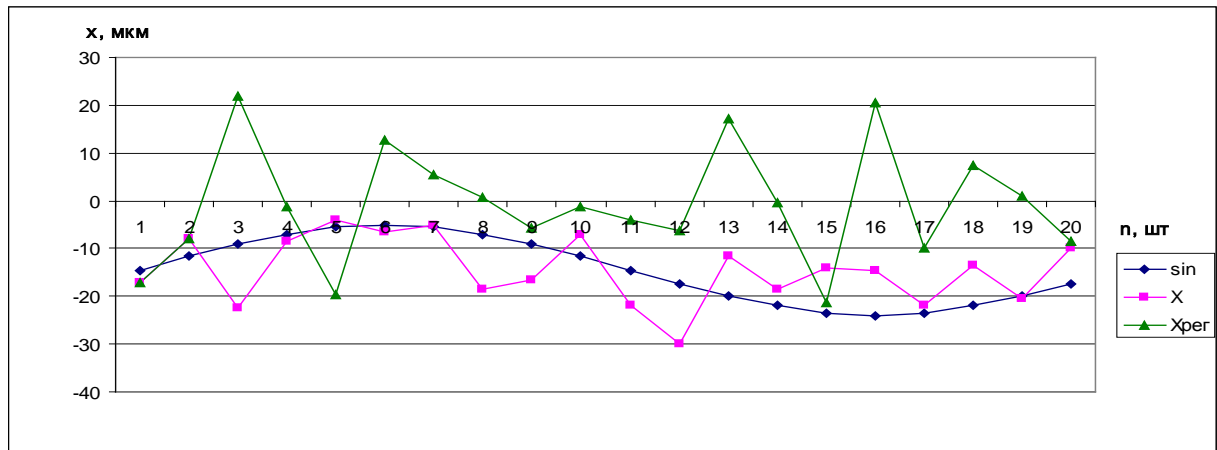


Рисунок 5.2. Исследование эффективности управления по формуле (3) при синусоидальной модели систематической составляющей, ($A_{эф} = 0,760435$; $n = 3$; $k_1 = 0,2$; $k_2 = 1,5$)

Таблица 5.2

Сравнение реализации регулируемого и нерегулируемого процессов при управлении по формуле (3) при синусоидальной модели систематической составляющей.

№ п/п	Массив отклонений																		D_n/D		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
1	31,50	22,50	37,00	23,00	18,50	21,00	19,50	33,00	31,00	21,50	36,50	44,50	26,00	33,00	28,50	29,00	36,50	28,00	35,00	24,50	1,387619
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	37,50	39,50	33,00	31,00	25,50	31,00	33,50	7,00	28,00	22,50	19,50	47,50	49,00	22,00	48,50	46,00	35,50	41,00	35,00	18,50	1,272701
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	23,50	14,50	25,00	24,00	11,50	8,00	15,50	11,00	37,00	40,50	40,50	28,50	42,00	51,00	47,50	30,00	23,50	41,00	21,00	38,50	0,375057
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	23,50	25,50	37,00	29,00	11,50	25,00	19,50	32,00	25,00	41,50	25,50	45,50	43,00	47,00	48,50	26,00	26,50	51,00	34,00	21,50	0,905391
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	43,50	18,50	25,00	36,00	14,50	34,00	21,50	17,00	26,00	38,50	36,50	41,50	45,00	47,00	41,50	39,00	31,50	47,00	27,00	19,50	1,221293
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,50	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	0,718029
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,642355
	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	22,00	5,50	28,00	26,00	41,50	39,50	31,50	46,00	25,00	51,50	35,00	50,50	50,00	50,00	30,50	-	-	
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,113214
	37,50	36,50	9,00	18,00	15,30	11,29	8,61	8,29	6,57	5,32	4,48	3,78	3,09	2,57	2,14	1,78	1,47	1,22	1,02	0,84	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,773190
	28,50	29,50	23,00	17,00	31,50	11,00	14,50	37,00	26,00	36,50	17,50	37,50	49,00	27,00	51,50	35,00	41,50	26,00	20,00	20,50	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,524049
	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	19,00	18,50	30,00	22,00	15,50	22,50	25,50	48,00	30,00	32,50	47,00	46,50	40,00	26,00	20,50	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	43,50	33,50	34,00	35,00	21,63	19,71	17,17	14,08	11,20	9,63	7,99	6,57	5,45	4,56	3,77	3,13	2,60	2,16	1,79	1,49	-	-	

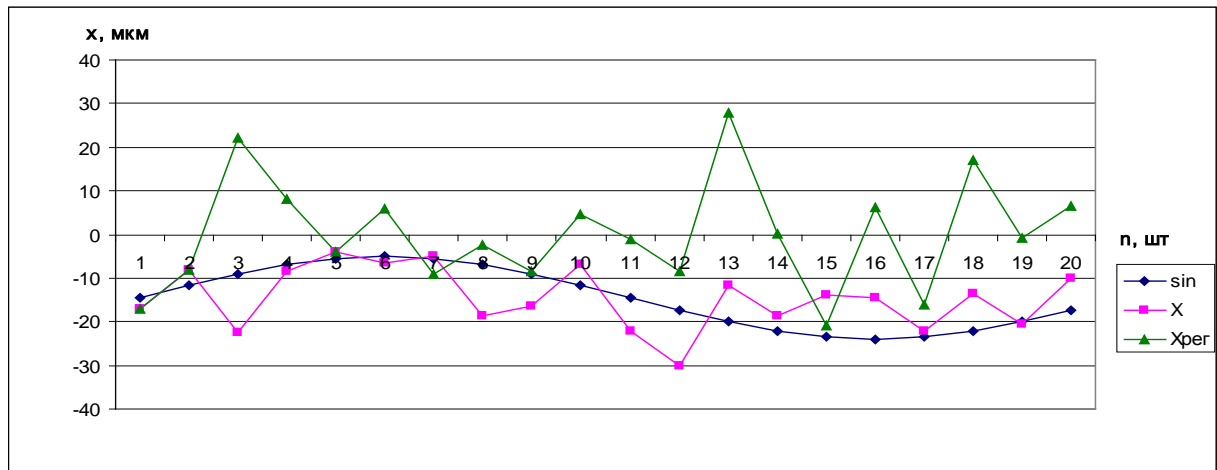


Рисунок 5.3. Исследование эффективности управления по формуле (4) при синусоидальной модели систематической составляющей, ($A_{эф} = 0,784558$; $n = 6$; $k_1 = 0,2$; $k_2 = 2,5$)

Таблица 5.3

Сравнение реализации регулируемого и нерегулируемого процессов при управлении по формуле (4) при синусоидальной модели систематической составляющей.

№ п/п	Массив отклонений																				D_n/D		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-
1	31,50	22,50	37,00	23,00	18,50	21,00	19,50	33,00	31,00	21,50	36,50	44,50	26,00	33,00	28,50	29,00	36,50	28,00	35,00	24,50	-	-	2,150900
	31,50	22,50	37,00	23,00	18,85	17,36	15,51	12,13	10,58	9,15	7,73	6,50	5,59	4,75	4,03	3,43	2,92	2,48	2,11	1,80	-	-	
2	37,50	39,50	33,00	31,00	25,50	31,00	33,50	7,00	28,00	22,50	19,50	47,50	49,00	22,00	48,50	46,00	35,50	41,00	35,00	18,50	-	-	1,197202
	37,50	39,50	33,00	31,00	23,03	20,98	17,77	15,12	12,65	10,94	9,26	7,87	6,69	5,70	4,84	4,12	3,51	2,98	2,54	2,16	-	-	

3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,352458
	23,50	14,50	25,00	24,00	11,50	8,00	15,50	11,00	37,00	40,50	40,50	28,50	42,00	51,00	47,50	30,00	23,50	41,00	21,00	38,50	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,850434
	23,50	25,50	37,00	29,00	11,50	25,00	19,50	32,00	25,00	41,50	25,50	45,50	43,00	47,00	48,50	26,00	26,50	51,00	34,00	21,50	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,156008
	43,50	18,50	25,00	36,00	14,50	34,00	21,50	17,00	26,00	38,50	36,50	41,50	45,00	47,00	41,50	39,00	31,50	47,00	27,00	19,50	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,686969
	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,50	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,617993
	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	22,00	5,50	28,00	26,00	41,50	39,50	31,50	46,00	25,00	51,50	35,00	50,50	50,00	50,00	30,50	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,052319
	26,50	36,50	30,00	20,00	10,50	24,00	26,50	15,00	30,00	15,50	20,50	38,50	48,00	22,00	23,50	28,00	48,50	26,00	34,00	25,50	-	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,641254
	28,50	29,50	23,00	17,00	31,50	11,00	14,50	37,00	26,00	36,50	17,50	37,50	49,00	27,00	51,50	35,00	41,50	26,00	20,00	20,50	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,433003
	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	19,00	18,50	30,00	22,00	15,50	22,50	25,50	48,00	30,00	32,50	47,00	46,50	40,00	26,00	20,50	-	-	-	

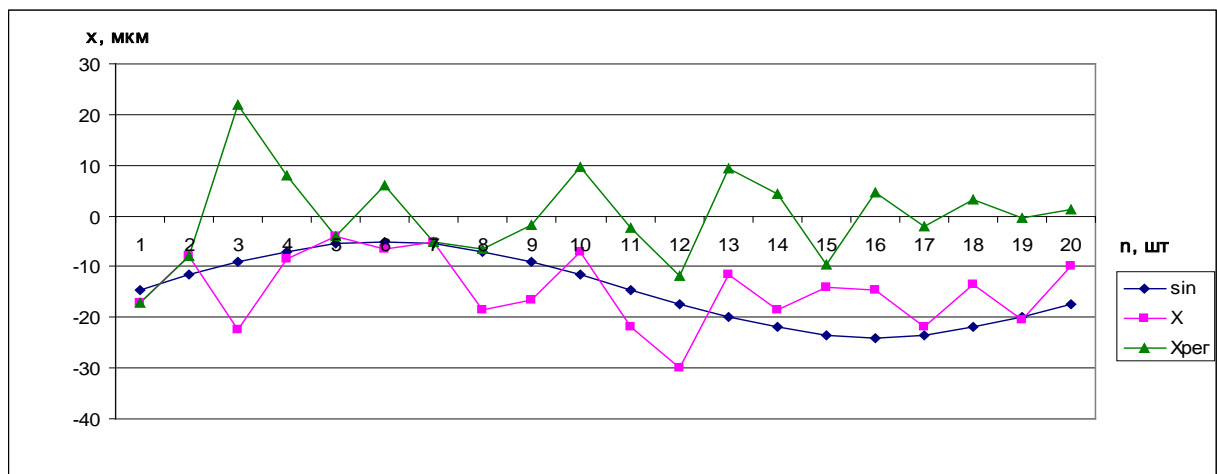


Рисунок 5.4. Исследование эффективности управления по формуле (5) при синусоидальной модели систематической составляющей, ($A_{\text{эф}} = 0,547284$; $n = 7$; $k_1 = 4,6$)

Сравнение реализации регулируемого и нерегулируемого процессов при управлении по формуле (5) при синусоидальной модели систематической составляющей.

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
1	31,50	22,50	37,00	23,00	18,50	21,00	19,50	33,00	31,00	21,50	36,50	44,50	26,00	33,00	28,50	29,00	36,50	28,00	35,00	24,50	0,405197
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	31,50	22,50	37,00	23,00	25,72	27,69	23,71	24,73	24,28	23,00	22,99	22,35	21,71	21,35	20,80	20,31	19,88	19,40	18,96	18,52	0,176887
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	37,50	39,50	33,00	31,00	25,50	31,00	33,50	7,00	28,00	22,50	19,50	47,50	49,00	22,00	48,50	46,00	35,50	41,00	35,00	18,50	0,050762
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	37,50	39,50	33,00	31,00	32,60	30,36	29,86	29,61	28,50	28,00	27,41	26,68	26,12	25,52	24,91	24,35	23,79	23,24	22,71	22,18	0,113538
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	23,50	14,50	25,00	24,00	11,50	8,00	15,50	11,00	37,00	40,50	40,50	28,50	42,00	51,00	47,50	30,00	23,50	41,00	21,00	38,50	0,287697
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	23,50	14,50	25,00	24,00	20,36	22,66	21,26	20,35	20,57	19,73	19,29	18,98	18,43	18,04	17,65	17,21	16,83	16,44	16,06	15,69	0,113538
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	23,50	25,50	37,00	29,00	11,50	25,00	19,50	32,00	25,00	41,50	25,50	45,50	43,00	47,00	48,50	26,00	26,50	51,00	34,00	21,50	0,284215
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	23,50	25,50	37,00	29,00	29,72	30,97	28,22	28,39	27,92	26,80	26,48	25,83	25,15	24,66	24,06	23,49	22,97	22,43	21,92	21,42	0,316312
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	43,50	18,50	25,00	36,00	14,50	34,00	21,50	17,00	26,00	38,50	36,50	41,50	45,00	47,00	41,50	39,00	31,50	47,00	27,00	19,50	0,225830
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	43,50	18,50	25,00	36,00	24,84	27,98	28,66	25,48	26,33	25,62	24,54	24,40	23,70	23,09	22,67	22,09	21,58	21,11	20,60	20,13	0,156577
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,00	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	0,316312
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	32,50	26,50	33,00	9,00	20,04	19,34	14,39	17,64	16,24	15,20	15,77	14,96	14,59	14,45	13,98	13,69	13,41	13,06	12,78	12,48	0,225830
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	22,00	5,50	28,00	26,00	41,50	39,50	31,50	46,00	25,00	51,00	35,00	50,50	50,00	50,00	30,50	0,156577
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	37,50	36,50	9,00	18,00	18,76	13,22	16,33	15,33	14,09	14,71	13,99	13,59	13,13	13,04	12,76	12,51	12,18	11,92	11,65	11,37	0,208357
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	26,50	36,50	30,00	20,00	10,50	24,00	26,50	15,00	30,00	15,50	20,50	38,50	48,00	22,00	23,50	28,00	48,50	26,00	34,00	25,50	0,208357
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	26,50	36,50	30,00	20,00	27,16	23,94	22,27	23,66	22,08	21,61	21,50	20,69	20,31	19,89	19,36	18,95	18,52	18,07	17,67	17,26	0,156577
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	28,50	29,50	23,00	17,00	31,50	11,00	14,50	37,00	26,00	36,50	17,50	37,50	49,00	27,00	51,00	35,00	41,50	26,00	20,00	20,50	0,156577
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	28,50	29,50	23,00	17,00	21,32	18,97	18,01	18,74	17,62	17,29	17,11	16,52	16,20	15,86	15,45	15,12	14,77	14,42	14,10	13,77	0,208357
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	19,00	18,50	30,00	22,00	15,50	22,50	25,50	48,00	30,00	32,50	47,00	46,50	40,00	26,00	20,50	0,208357
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	43,50	33,50	34,00	35,00	32,12	32,25	31,66	30,46	30,06	29,32	28,57	27,99	27,32	26,68	26,09	25,47	24,89	24,32	23,76	23,21	0,208357
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

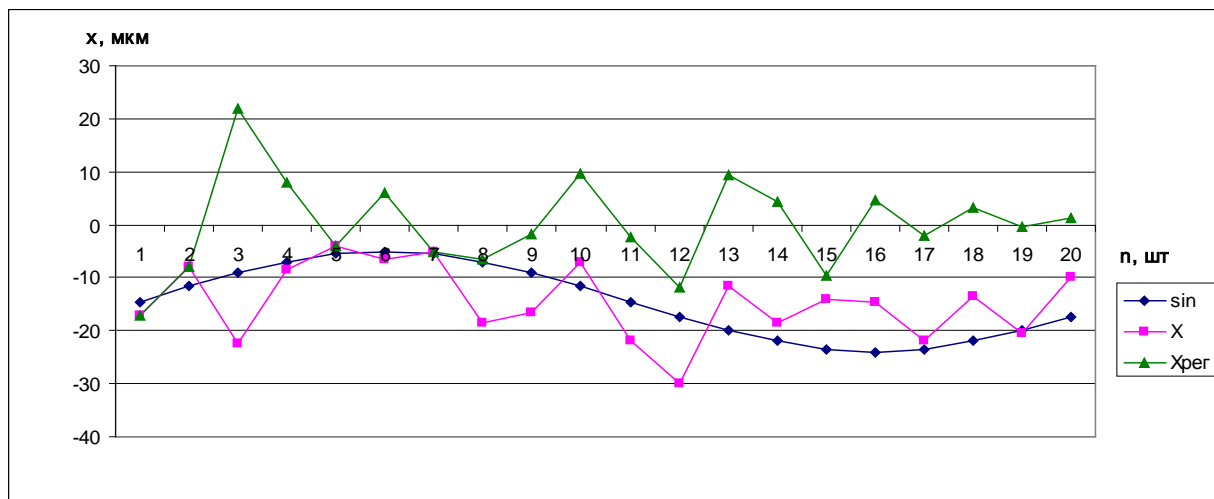


Рисунок 5.5. Исследование эффективности управления по формуле (6) при синусоидальной модели систематической составляющей, ($A_{\phi} = 0,549525$; $n = 7$; $k_1 = 1,6$; $k_2 = 4,7$; $k_3 = 0,2$)

Таблица 5.5

Сравнение реализации регулируемого и нерегулируемого процессов при управлении по формуле (6) при синусоидальной модели систематической составляющей.

№ п/п	Массив отклонений																			D_n/D	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1	31,50	22,50	37,00	23,00	18,50	21,00	19,50	33,00	31,00	21,50	36,50	44,50	26,00	33,00	28,50	29,00	36,50	28,00	35,00	24,50	0,267245
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	37,50	39,50	33,00	31,00	25,50	31,00	33,50	7,00	28,00	22,50	19,50	47,50	49,00	22,00	48,50	46,00	35,50	41,00	35,00	18,50	0,062187
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	23,50	14,50	25,00	24,00	11,50	8,00	15,50	11,00	37,00	40,50	40,50	28,50	42,00	51,00	47,50	30,00	23,50	41,00	21,00	38,50	0,050743
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	23,50	25,50	37,00	29,00	11,50	25,00	19,50	32,00	25,00	41,50	25,50	45,50	43,00	47,00	48,50	26,00	26,50	51,00	34,00	21,50	0,162978
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	43,50	18,50	25,00	36,00	14,50	34,00	21,50	17,00	26,00	38,50	36,50	41,50	45,00	47,00	41,50	39,00	31,50	47,00	27,00	19,50	0,285068
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,50	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	0,228751
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	32,50	26,50	33,00	9,00	11,50	11,00	25,50	16,00	20,00	36,50	44,50	28,50	41,00	46,00	51,50	33,00	24,50	23,00	28,00	17,50	0,228751
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,192777
	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	22,00	5,50	28,00	26,00	41,50	39,50	31,50	46,00	25,00	51,50	35,00	50,50	50,00	50,00	50,00	30,50		
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,249303
	37,50	36,50	9,00	18,00	27,50	25,77	21,68	19,53	23,47	24,30	22,35	21,92	22,52	23,15	22,79	22,37	22,58	22,77	22,73	22,60			
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,063838
	28,50	29,50	23,00	17,00	31,50	11,00	14,50	37,00	26,00	36,50	17,50	37,50	49,00	27,00	51,50	35,00	41,50	26,00	20,00	20,50			
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,224803
	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	19,00	18,50	30,00	22,00	15,50	22,50	25,50	48,00	30,00	32,50	47,00	46,50	40,00	26,00	20,50			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	43,50	33,50	34,00	35,00	15,50	35,23	33,05	28,12	29,29	28,37	31,43	30,06	28,87	29,78	29,88	30,00	29,63	29,57	29,85	29,80			

Дополнительные исследования при наличии систематической составляющей, распределенной по синусоидальному закону, показали, что общая картина практически не изменилась, то есть выявлена неэффективность регулирования по формуле (2), несмотря на введение коэффициента k_1 , относительно невысокая эффективность регулирования по формулам (3) и (4), и подтверждается достаточно высокий уровень эффективности регулирования по формулам (5) и (6) [3].

Все эти исследования были проведены на основе предположения, что скользящая средняя по сравнению с дискретными выборками может лучше выявить изменение систематической составляющей.

Выводы.

Проведенные исследования показали, что при определенной структуре формул, используемых в алгоритме управления, имеется возможность эффективного регулирования смешанных процессов с близкими по диапазону случайной и систематической составляющими.

Следует также отметить, что ввиду малости количества точек в используемой в исследованиях одной случайной реализации смешанного процесса нет возможности произвести идентификацию параметров модели и проводить исследования на основе такой идентифицированной модели. Поэтому результаты измерений рассматриваются как ряд распределения некоторой случайной величины и характеризуются величиной дисперсии.

Методика проведения исследований по существу может быть использована как методика определения объема выборки и значения коэффициентов в представленных алгоритмах.

Для технической реализации предложенных результатов можно использовать ранее выполненные работы в области активного контроля. То есть ранее были созданы устройства активного контроля, которые не только измеряли размер во время обработки, но и измеряли размер при окончании обработки, а затем автоматически корректировали свою настройку по результатам измерения. Современные приборы активного контроля чаще всего позволяют также обрабатывать результаты нескольких измерений [2]. Поэтому предполагается, что, определив коэффициенты управления k_i и объем выборки n , процедура регулирования будет состоять в следующем: измеряя размеры в соответствии с вычисленным объемом выборки, вычисляется управление по одной из формул (2)-(6), указанных выше, затем вводится управление, далее при измерении каждого следующего значения отклонения повторяются вычисления и вводится управление.

Список литературы

1. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью металлообработки на металлорежущих станках. Л.: Машиностроение, 1982. 184 с.
2. Рашоян И.И. Повышение точности формы сложнопрофильных поверхностей деталей при круглом врезном шлифовании прерывистыми кругами: дис.... канд. техн. наук. Самара, 2005. 160 с.
3. Лиморенко А.Д., Шачнев Ю.А. Исследование влияния структуры алгоритмов на точность управления // X Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники»: сборник материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 133-136.
4. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1972. 216 с.
5. ГОСТ Р 50779.41-96. Статистические методы. Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. Введ. 1997-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1996. 12 с.

Investigating the possibility of improving precision of part processing by using control algorithm

11, November 2012

DOI: [10.7463/1112.0483097](https://doi.org/10.7463/1112.0483097)

Limorenko A.D., Shachnev Yu.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

LimorenkoAD@gmail.com

This article examines research (using models) of the control algorithms efficiency in statistical control methods. Ratio of variances before the regulation process and after was chosen as an optimality criterion. At the same time, relative effectiveness of algorithms with different structure was considered.

Publications with keywords: [control algorithm](#), [statistical methods of monitoring](#), [control of technological processes](#), [model of a mixed process](#)

Publications with words: [control algorithm](#), [statistical methods of monitoring](#), [control of technological processes](#), [model of a mixed process](#)

References

1. Nevel'son M.S. *Avtomaticheskoe upravlenie tochnost'iu metalloobrabotki na metallovezhushchikh stankakh* [Automatic control of precision of metal working on metal-cutting machines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 184 p.
2. Rashoian I.I. *Povyshenie tochnosti formy slozhnoprofil'nykh poverkhnostei detalei pri kruglom vreznom shlifovanii preryvistymi krugami. Kand. diss.* [Increasing the accuracy of the form of complex-profile surfaces of parts for round plunge grinding by discontinuous circles. Cand. diss.]. Samara, 2005. 160 p.
3. Limorenko A.D., Shachnev Yu.A. *Issledovanie vliianiia struktury algoritmov na tochnost' upravleniia* [Investigation of influence of structure of algorithms on the accuracy of control]. *10 Vserossiiskoe soveshchanie-seminar «Inzhenerno-fizicheskie problemy novoi tekhniki»: sbornik materialov* [10-th all-Russia conference-seminar «Engineering and physical problems of new technics»: collect. of materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012, pp. 133-136.
4. Solonin I.S. *Matematicheskaiia statistika v tekhnologii mashinostroeniia* [Mathematical statistics in mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 216 p.
5. *GOST R 50779.41-96. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty dlia arifmeticheskogo srednego s preduprezhdaiushchimi granitsami* [State Standard of RF 50779.41-96. Statistical methods. Control charts for arithmetic average with warning limits]. Moscow, Izd-vo standartov [Standards Publishing House], 1996. 12 p.