

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ ГЕНЕРАТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Разработан генератор детерминированного хаоса для формирования сигналов с заданными параметрами с целью исследования реакции систем на хаотические воздействия, характер протекания технологических процессов, устойчивости и надежности систем.

Розроблено генератор детермінованого хаосу для формування сигналів із заданими параметрами з метою дослідження реакції систем на хаотичні впливи, характер протікання технологічних процесів, стійкості і надійності систем.

Generator of deterministic chaos for generating signals with the given parameters is worked out. This makes it possible to investigate the response of systems to chaotic influences, the character of technical processes, stability and reliability.

В горных геотехнических системах, прежде всего, в силу специфики геологического строения породных массивов, высокой фрактальной размерности пород и полезных ископаемых, являющимися одновременно объектами, вмещающими шахты, рудники и подземные сооружения, и объектами добычи и переработки, возможно как самопроизвольное возникновение процессов самоорганизации, так и хаотических процессов. Эти процессы могут быть доминирующими или частичными, а в зависимости от положения равновесия – устойчивыми или неустойчивыми.

Для изучения устойчивости реальных элементов геомеханических объектов, например, элементов рамно-анкерной крепи, их моделей к возможным динамическим воздействиям, в том числе и хаотическим, необходимо дальнейшее исследование реакции системы на хаотические воздействия, характер протекания технологических процессов, устойчивость и надежность системы.

Целью данной работы является разработка генератора динамического хаоса и его апробация для исследования устойчивости реальных геомеханических систем.

Для изучения устойчивости реальных геотехнических систем, их моделей к возможным динамическим воздействиям, в том числе и хаотическим, натурального и полунатурного моделирования разработан генератор детерминированного хаоса на основе системы уравнений Лоренца (ГДХ) [1,2]. Он предназначен для формирования сигналов с заданными параметрами и ввода их по трем координатам в геотехническую систему как возмущающих воздействий или как сигналов изменяющейся нагрузки. При этом можно исследовать реакцию системы на эти хаотические воздействия, характер протекания технологических процессов, устойчивость и надежность системы. Данный вид моделирования является актуальным, так как технологические установки в шахтных условиях функционируют как динамические системы с элементами стохастического или детерминированного хаоса (геотехнические системы, буровые установки, движение жидкости или пульпы в режиме турбулентности) [3].

Для обеспечения максимального быстродействия генератора программирование выполнено полностью на ассемблере, а в качестве способа оптимизации выполнения программы по времени вычисления предложен выбор параметрических коэффициентов-множителей кратный двум с заменой операций умножения и деления линейными сдвигами.

Для анализа модели запишем систему Лоренца уравнениями в конечных приращениях Δx , Δy , Δz по выходным координатам [4]:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = \sigma(y_{i-1} - x_{i-1}); \\ \frac{\Delta y_i}{\Delta t} = -x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1}; \\ \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1}; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x_i = \sigma(y_{i-1} - x_{i-1})\Delta t; \\ \Delta y_i = (-x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1})\Delta t; \\ \Delta z_i = (x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1})\Delta t, \end{cases} \quad (1)$$

где i – номер текущей точки; Δt – конечное приращение по времени.

Численное интегрирование системы выполняется в программном блоке, оформленном в виде функции пользователя с передачей параметров в тело программного блока из основного электронного листа Mathcad. Это позволяет многократно вызывать данную функцию с подстановкой конкретных значений формальных параметров при моделировании различных режимов работы генератора.

В литературе в качестве примера приводятся следующие значения параметрических коэффициентов, обеспечивающие хаотический режим работы генератора: $\sigma = 10$; $r = 28$; $b = \frac{8}{3} = 2,6(6)$. Как показывает моделирование, при таких значениях коэффициентов и достаточно малом шаге интегрирования система совершает нерасходящиеся хаотические колебания и даже при сколь угодно большом числе точек выходные координаты лежат в пределах $x \in (-25, 25)$, $y \in (-30, 30)$, $z \in (0, 60)$ в округлении до ближайшего целого, кратного пяти. Таким образом, нет принципиальных ограничений для реализации такого генератора на основе микроконтроллера. Однако из уравнений в конечных разностях (1) видно, что расчеты предусматривают вычисление нескольких арифметических произведений. Определяются произведения мгновенных значений двух выходных координат, например $x_{i-1} \times y_{i-1}$; произведения мгновенного значения координаты на параметрический коэффициент, например $r \times x_{i-1}$; произведения тангенса угла наклона касательной к графику интегрируемой функции в расчетной точке на значение шага интегрирования, например $[\sigma(y_{i-1} - x_{i-1})] \times h$. При реализации генератора с помощью микропроцессорных средств наиболее длительными в вычислительном цикле являются операции умножения и деления даже в том случае, когда используется целочисленная арифметика над операндами низкой разрядности и арифметико-логическое устройство микропроцессора или микроконтроллера (МК) имеет

аппаратные умножитель и делитель (например, система команд микроконтроллера семейства MCS-51/52 содержит команды умножения MUL и деления DIV, в отличие от большинства микроконтроллеров с RISC-архитектурой). Поэтому для увеличения быстродействия (а, следовательно, для обеспечения возможности вычислений с меньшим шагом счета и большей точностью) следует по возможности сократить число произведений в вычислительной схеме. Этого можно добиться следующими способами: 1) упрощением выражений; 2) группировкой слагаемых и выносом множителей за скобки; 3) предварительным умножением заранее известных множителей до программирования на этапе алгоритмизации; 4) заменой арифметического умножения на заранее предустановленный множитель, кратный двум, логическим сдвигом операнда, представленного в двоичном коде, влево; число сдвигов равно степени кратности; 5) заменой арифметического деления на множитель, кратный двум, логическим сдвигом вправо; число сдвигов равно степени кратности.

Очевидно, что имеется область значений коэффициентов, в пределах которой система проявляет себя как хаотическая. Задача поиска коэффициентов, кратных двум, принадлежащих этой области, решается следующим образом. Составляется трехмерная комбинационная таблица – описание координатной системы, по трем осям которой в первом квадранте откладываются кратные двум значения коэффициентов σ , r и b в пределах от 0 до значений, соответствующих жесткой потере устойчивости с расхождением функции (расхождение детектируется по переполнению при выполнении вычислений). Далее вызывается функция $Lorenz(x, y, z, \sigma, r, b, h, n)$ с подстановкой параметрических коэффициентов из комбинационной таблицы. Полученные графики анализируются визуально, определяются спектральные и автокорреляционные характеристики выходных координат и выбираются значения коэффициентов для реализации генератора (рис. 1, табл. 1).

Рассмотрим плоский срез трехмерной комбинационной таблицы параметрических коэффициентов, соответствующий фиксированному значению параметра $b = 2$. Из рис. 1 видно, что при $r < 16$, независимо от значения параметрического коэффициента σ , система описывает сходящуюся в точку траекторию, т. е. имеет место затухающий колебательный процесс. То же можно отметить и для следующих пар коэффициентов: $(r = 16, \sigma = 2)$, $(r = 16, \sigma = 32)$, причем в последнем случае система находится вблизи зоны бифуркации (исходная точка траектории при заданных начальных условиях лежит в области притяжения одной петли, но затем система переходит в область притяжения конечной точки, спиралевидное движение к которой образует вторую петлю; очевидно, что незначительное изменение параметров в сторону увеличения r и (или) в сторону уменьшения σ приведет к изменению динамического поведения системы с появлением двухпетлевого аттрактора, т. е. к бифуркации).

Следующие пары коэффициентов $(r, \sigma) = \{(16, 4), (16, 8), (16, 16); (32, 2), (32, 4), (32, 8), (32, 16), (32, 32)\}$ обеспечивают двухпетлевой аттрактор в фазовых плоскостях выходных координат (рис. 1). С целью выбора конкретных параметров для реализации в микропроцессорном устройстве рассмотрим авто-

корреляционные функции сигналов генератора и их статистические характеристики (рис. 2, табл. 1). Выходные сигналы генератора являются псевдослучайными и могут быть использованы для добавления шумов в каналы технического устройства. Поэтому весьма важными становятся статистические параметры, определяемые обычно для выборок, каждая из которых соответствует одинаковым условиям измерений. Это средние арифметическое и геометрическое значения по выборке, центральные и начальные моменты, смещенные дисперсия и среднеквадратическое отклонение и др. Для сигналов x и y средние арифметические значения стремятся к нулю при увеличении числа точек, поэтому величины отклонения этих значений от нуля для достаточно большой выборки (колонки 7, 8 табл. 1) являются одним из критериев работоспособности ГДХ и качества генерируемых сигналов. В частности, в случае затухающих периодических колебаний можно наблюдать, что средние значения приближаются к величинам, значительно отличным от нуля (строки 1, 15 табл. 1), а именно к установившимся значениям по соответствующим координатам. В остальных случаях отклонение среднего арифметического от нуля не превышает 2 % от диапазона изменения соответствующего сигнала по амплитуде (размаха сигнала). Однако данный критерий не является достаточным при определении параметров ГДХ, хотя и позволяет автоматически отсеивать заведомо непригодные варианты. Например, с помощью данного критерия невозможно выявить комбинации параметров, при которых ГДХ генерирует незатухающий апериодический сигнал с неудовлетворительной АКФ (строки 5, 6 табл. 3.1).

Отметим также, что дисперсии D_x , D_y и D_z (колонки 10 – 12 табл. 1) и среднеквадратические отклонения σ_x , σ_y и σ_z (колонки 13 – 15 табл. 1) в случае затухающих колебаний при увеличении числа точек стремятся к нулю, что объясняется распределением отклонений сигнала от среднего значения, имеющих место только в начальных точках траектории, когда характер процесса еще колебательный, на все большее число точек выборки, зафиксированных уже при установившемся состоянии генератора.

Начальный момент 1-го порядка по координате z (колонка 9 табл. 1) при увеличении числа точек не стремится ни к нулю, ни к середине амплитудного диапазона, и данная характеристика сигнала может быть интересна с точки зрения использования разработанного ГДХ, но не может являться критерием для выбора его параметров.

Не менее важными, а в некоторых случаях определяющими, являются параметры автокорреляционной функции и спектра сигнала, подтверждающие либо опровергающие «апериодичность» и «случайность» незатухающего сигнала. Так, автокорреляционная функция должна быть быстро спадающей без вторичных пиков значительной амплитуды (идеальной формой АКФ можно считать импульс единичной амплитуды и нулевой длительности в точке, соответствующей нулевому сдвигу).

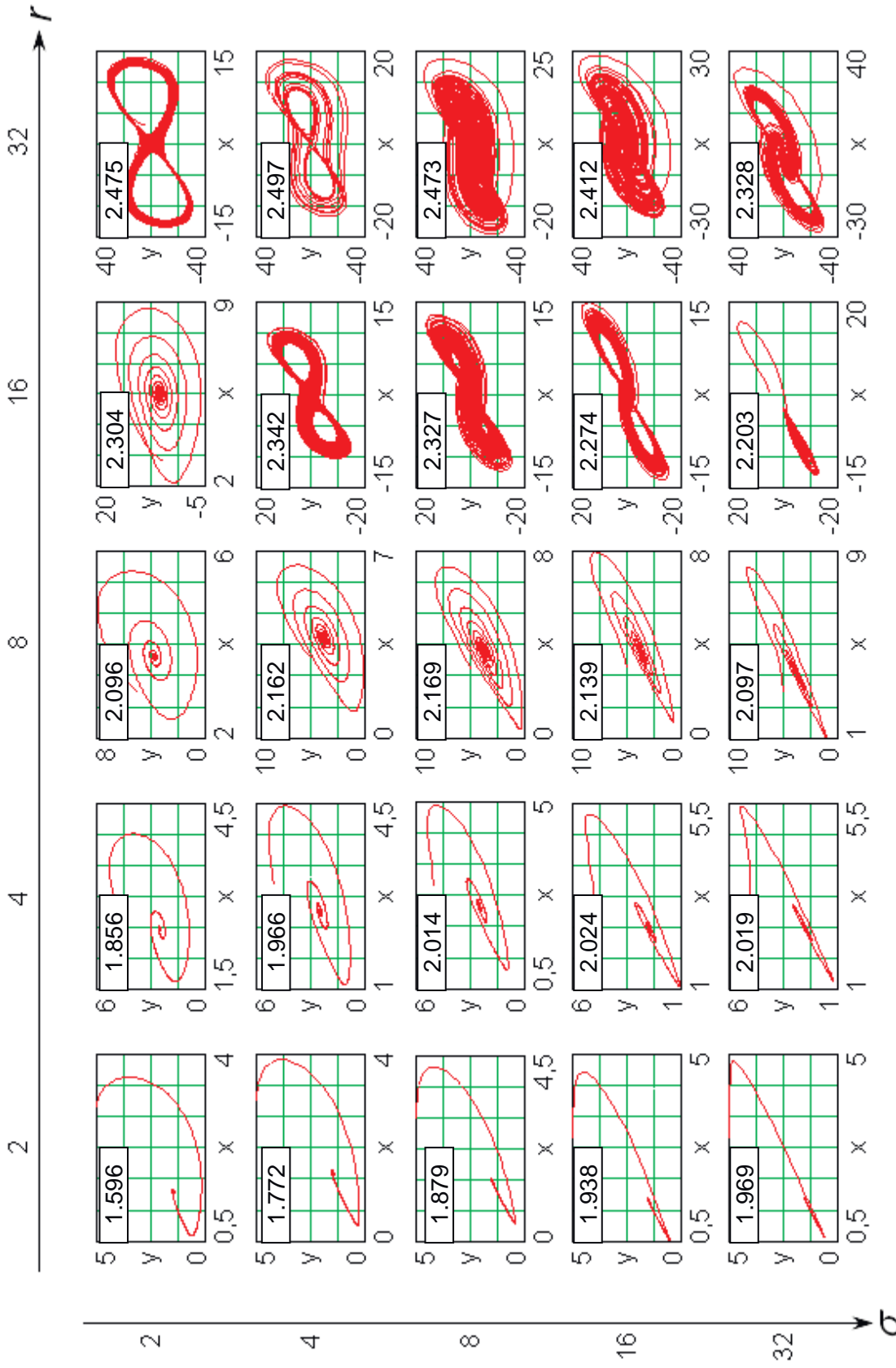


Рис. 1. Влияние величин параметрических коэффициентов r и σ на вид и форму аттрактора ($b = 2, h = 1/64, n = 10000$). В верхнем левом углу графиков – размерность аттрактора $\dim LK, o. e.$

Таблица 1

Параметры модели генератора, статистические данные сигналов и их функций автокорреляции

№ п/п	Параметрические коэфф., о.е.		Ссылка на рис.	Вид процесса, форма ат-трактора	Начальный момент 1-го порядка, о.е.			Дисперсия смещенная, о.е.			
		<i>b</i>			M_x	M_y	M_z	D_x	D_y	D_z	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	16	2	Рис. 1	Загужающий периодический	5.48	5.48	14.99	0.01	0.09	0.13
2	2	32	2	Рис. 1	Хаотич., двухпетлевой	-0.06	-0.06	19.04	40.51	190.53	236.72
3	4	16	1	-	Хаотич., двухпетлевой	-0.18	-0.18	13.87	13.99	18.15	14.99
4	4	16	2	Рис. 1, 2	Хаотич., двухпетлевой	0.11	0.11	11.67	23.80	38.03	39.27
5	4	32	2	Рис. 1, 3	Хаотич., двухпетлевой	8.47E-03	4.43E-03	27.27	57.36	141.67	124.05
6	4	32	4	-	Хаотич., одна петля	3.18E-04	2.88E-04	22.05	94.41	280.74	258.08
7	8	16	2	Рис. 1	Хаотич., двухпетлевой	-0.06	-0.06	13.14	26.67	31.91	28.59
8	8	32	2	Рис. 1, 2	Хаотич., двухпетлевой	0.01	0.01	29.63	61.14	86.90	69.05
9	8	32	4	-	Хаотич., двухпетлевой	5.07E-03	5.66E-03	26.81	113.89	206.98	182.86
10	10	28	2.67	Рис. 2	Хаотич., двухпетлевой	-0.09	-0.09	25.58	69.86	87.53	59.52
11	16	16	2	Рис. 1	Хаотич., двухпетлевой	-0.14	-0.14	12.76	25.88	28.07	37.41
12	16	32	2	Рис. 1	Хаотич., двухпетлевой	-0.13	-0.13	29.45	61.30	75.66	109.43
13	16	32	4	-	Хаотич., двухпетлевой	-0.04	-0.04	29.42	121.73	146.05	104.63
14	16	32	8	-	Хаотич., двухпетлевой	0.06	0.06	26.78	226.81	302.21	217.34
15	32	16	2	Рис. 1	Загужающий периодический вблизи бифуркации	-5.45	-5.46	14.99	0.24	0.24	0.39
16	32	32	2	Рис. 1, 3	Хаотич., двухпетлевой	-0.01	-0.01	28.77	60.38	66.04	187.43

Таблиця 1 (продолжение)
 Параметры модели генератора, статистические данные сигналов и их функций автокорреляции

№ п/п	Среднеквадратическое отклонение, о.е.			Коефф. асимметрии графика закона распределения значений АКФ, о.е.			Коефф. эксцесса графика закона распределения значений АКФ, о.е.			Смещение 1-го пересечения АКФ с осью абсцисс, о.е.		
	σ_x	σ_y	σ_z	As_x	As_y	As_z	Ex_x	Ex_y	Ex_z	Nr_x	Nr_y	Nr_z
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0.11	0.30	0.36	2.81	1.65	4.59	93.33	88.20	96.26	19.60	18.26	18.26
2	6.36	13.80	15.39	12.69	15.18	0.21	236.22	390.89	-1.22	45.87	18.26	17.01
3	3.74	4.26	3.87	5.69	7.04	0.85	56.52	88.48	12.63	727.01	727.01	27.94
4	4.88	6.17	6.27	13.00	15.42	0.10	226.93	327.12	-1.40	56.73	47.53	21.04
5	7.57	11.90	11.14	-6.22E-04	3.20E-04	1.30	-0.15	-0.54	0.48	25.12	19.60	13.76
6	9.72	16.76	16.06	-2.11E-03	-8.34E-04	0.33	-1.31	-0.27	-1.39	22.59	18.92	10.36
7	5.16	5.65	5.35	13.53	14.79	0.11	246.28	298.03	-0.81	67.73	60.90	18.92
8	7.82	9.32	8.31	15.97	18.99	5.82	357.25	501.77	171.26	38.43	33.35	13.76
9	10.67	14.39	13.52	0.11	0.23	1.54	6.01	8.47	14.81	16.42	13.28	10.36
10	8.36	9.36	7.71	14.93	17.12	4.59	311.06	412.69	141.06	107.34	103.61	12.37
11	5.09	5.30	6.12	10.64	11.05	0.20	224.87	244.40	2.53	45.87	45.39	18.26
12	7.83	8.70	10.46	5.07	6.21	3.49	147.78	193.94	128.78	25.12	26.96	14.25
13	11.03	12.08	10.23	18.51	20.38	4.90	486.33	592.79	192.14	27.94	26.96	9.32
14	15.06	17.38	14.74	6.76	8.30	2.65	191.00	246.27	75.83	12.37	11.12	6.77
15	0.48	0.49	0.62	10.07	10.20	5.38	153.61	159.21	150.31	21.04	20.31	15.85
16	7.77	8.13	13.69	19.00	19.87	0.78	537.63	588.71	11.45	86.79	85.27	14.25

Таблица 1 (продолжение)
 Параметры модели генератора, статистические данные сигналов и их функций автокорреляции

№ п/п	Суммы 5-ти (3-х) максимальных пиков АКФ, о.е.					Коэфф. затухания АКФ по суммам амплитуд, о.е.			Особенности траектории	Особенности АКФ	Реализация	
	S_{5x}	S_{3x}	S_{5y}	S_{3y}	S_{5z}	S_{3z}	k_{S_x}	k_{S_y}				k_{S_z}
1	2,409	1,725	2,509	1,798	2,245	1,561	1,193	1,194	1,159	Прим. 1.1	Прим. 2.1	Не удовлетворяет требованиям
2	0,477	0,305	0,617	0,461	2,949	1,779	1,066	1,245	1,005	Прим. 1.2	Прим. 2.2	Не рекомендован
3	0,477	0,344	0,422	0,297	2,13	1,397	1,202	1,173	1,093	Прим. 1.3	Прим. 2.3	Не рекомендован
4	0,383	0,234	0,391	0,266	2,708	1,656	1,018	1,134	1,019	Прим. 1.4	Прим. 2.4	Реализован
5	5	3	5	3	5	3	1	1	1	Прим. 1.5	Прим. 2.5	Не удовлетворяет требованиям
6	5	3	5	3	5	3	1	1	1	Прим. 1.6	Прим. 2.6	Не удовлетворяет требованиям
7	0,297	0,188	0,281	0,18	2,467	1,561	1,055	1,068	1,055	Прим. 1.7	Прим. 2.7	Не рекомендован
8	0,328	0,211	0,297	0,195	1,094	0,789	1,072	1,094	1,202	Прим. 1.8	Прим. 2.8	Реализован
9	3,566	2,236	3,038	1,917	2,578	1,648	1,045	1,052	1,065	Прим. 1.9	Прим. 2.9	Не рекомендован
10	0,266	0,164	0,242	0,164	1,497	1,023	1,028	1,129	1,139	Прим. 1.10	Прим. 2.10	Исходные параметры
11	0,758	0,578	0,766	0,578	3,328	2,061	1,271	1,258	1,032	Прим. 1.11	Прим. 2.11	Не рекомендован
12	1,344	1,102	1,211	0,992	1,725	1,197	1,367	1,365	1,157	Прим. 1.12	Прим. 2.12	Не рекомендован
13	0,266	0,164	0,25	0,164	1,665	1,142	1,028	1,093	1,143	Прим. 1.13	Прим. 2.13	Не рекомендован
14	1,375	1,008	1,258	0,93	2,017	1,292	1,222	1,232	1,068	Прим. 1.14	Прим. 2.14	Рекомендован
15	1,383	0,984	1,352	0,969	1,839	1,452	1,186	1,195	1,316	Прим. 1.15	Прим. 2.15	Не удовлетворяет требованиям
16	0,695	0,586	0,695	0,586	3,656	2,267	1,405	1,405	1,033	Прим. 1.16	Прим. 2.16	Не рекомендован

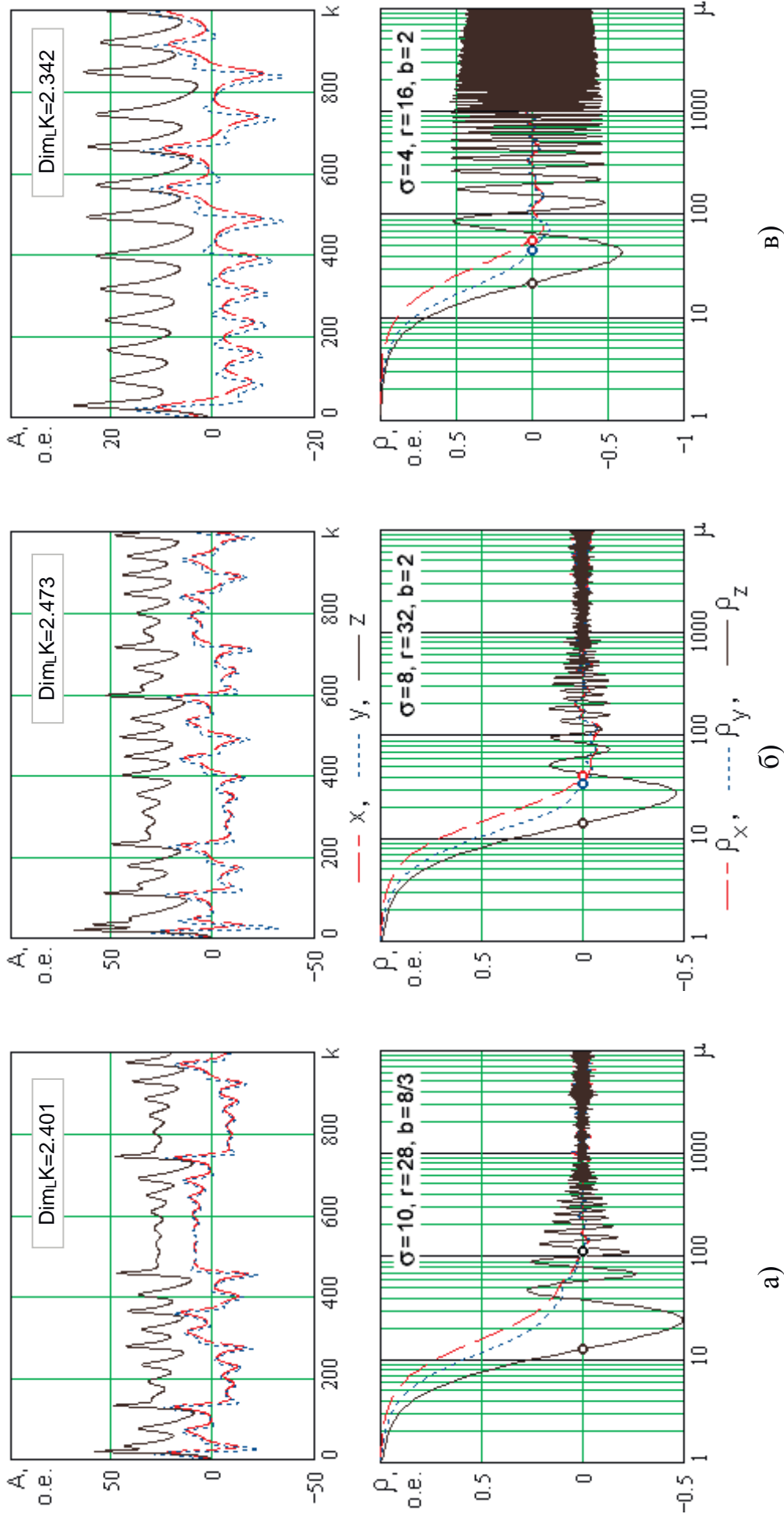


Рис. 2. Осциллограммы сигналов (вверху) и их автокорреляционные функции (внизу): а) модель с исходными параметрическими коэффициентами; б, в) реализованные модели с коэффициентами из ряда 2^k .

Ограничившись лишь визуальной качественной оценкой графиков АКФ, мы снизили бы универсальность предлагаемой методики и исключили бы возможность автоматизации процесса выбора параметрических коэффициентов. В этой связи, а также для исключения субъективизма в оценке, введем числовые показатели качества АКФ:

– коэффициент асимметрии As_x графика закона распределения значений функции автокорреляции по координате x (по координатам y и z формулы аналогичны) равен, о. е.:

$$As_x = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{N-2} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\rho_{x_i} - \overline{\rho_x})^3}{N\sigma_{\rho_x}^3}, \quad (2)$$

где N – количество точек функции автокорреляции; ρ_{x_i} – текущее значение функции автокорреляции по координате x ; $\overline{\rho_x}$ – среднее значение функции автокорреляции по координате x ; σ_{ρ_x} – несмещенное среднеквадратическое отклонение ρ_x . Ошибка коэффициента асимметрии определяется числом точек

N для АКФ по любой координате: $S_{As} = \sqrt{\frac{6N(N-1)}{(N-2)(N+1)(N+3)}}$ (для данных табл. 1 при $N=10$ тыс. точек имеем $S_{As} = 0,024$ о. е.); коэффициент эксцесса Ex_x графика закона распределения значений функции автокорреляции по координате x (по координатам y и z формулы аналогичны), о. е.:

$$Ex_x = \frac{N-1}{(N-2)(N-3)} \left[(N+1) \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\rho_{x_i} - \overline{\rho_x})^4}{N\sigma_{\rho_x}^4} - 3N + 3 \right], \quad (3)$$

причем ошибка коэффициента эксцесса также определяется числом N ; сдвиг Nr , соответствующий первому пересечению графика АКФ с осью абсцисс (рис. 2); суммы амплитуд первых пяти (S_5) и трех (S_3) экстремальных пиков АКФ и соотношение этих сумм (коэффициент, характеризующий скорость затухания «паразитных» пиков АКФ):

$$k_S = 0,6 \cdot S_5 / S_3. \quad (4)$$

В табл. 1 сведены результаты моделирования работы генератора Лоренца при соотношениях параметров, обеспечивающих хаотический режим (строки 2 – 14, 16), а также характерные результаты, иллюстрирующие работу генератора в режиме затухающих периодических колебаний (строки 1, 15); данные отсортированы по возрастанию коэффициентов a , b в порядке взаимной очередности. К табл. 1 имеются следующие примечания:

– примечания, характеризующие визуально выявленные особенности траектории, описываемой системой на фазовой плоскости $y(x)$ (см. также рис. 1):

1.1) спиралевидная траектория, сходящаяся в точку фазовой плоскости, не совпадающую с началом координат; 1.2) незаполненные «контурные» петли, амплитуды пиков сигналов практически одинаковы; 1.3) равномерно заполненные петли; 1.4) равномерно заполненные петли в области, прилегающей к внешнему контуру петель; 1.5) наличие отдельных вложенных петель; 1.6) одна незаполненная петля, по форме схожая со знаком « ∞ »; 1.7) равномерно заполненные петли, тесная корреляционная связь между y и x , осциллограммы сигналов $y = f(t)$ и $x = f(t)$ практически совпадают; 1.8) равномерно заполненные петли; 1.9) неравномерно заполненные петли с пересечениями в пределах петли; 1.10) равномерно заполненные петли; 1.11) фазовая траектория «вытягивается» в линию – отрезок прямой вида $y = kx + c$, т. е. имеет место тесная корреляционная связь между y и x , осциллограммы сигналов $y = f(t)$ и $x = f(t)$ практически совпадают; 1.12) равномерно заполненные петли; 1.13) равномерно заполненные петли, значительная дискретность шага по x и y на внешних контурах петель; 1.14) равномерно заполненные петли в области, прилегающей к внешнему контуру петель; 1.15) спиралевидная траектория, сходящаяся в точку, отличную от начала координат; 1.16) петли, пересекающиеся в области, близкой к центру симметрии;

– примечания, характеризующие особенности функции автокорреляции (см. также рис. 2 и 3): 2.1) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами $\cong -0.7...+0.6$ о. е.; 2.2) множество пиков АКФ значениями $\cong -0.6...+0.6$ о. е. по координате z ; 2.3) крайне медленно спадающие АКФ по координатам x и y , множество пиков АКФ значениями $\cong -0.6...+0.4$ о. е. по координате z ; 2.4) быстро спадающие качественные АКФ по координатам x и y , множество пиков АКФ значениями $\cong -0.5...+0.5$ о. е. по координате z ; 2.5) множество пиков АКФ значениями ± 1 по всем координатам; 2.6) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами ± 1 по координатам x и y , множество пиков амплитудами $\cong -0.7, +1$ о. е. по координате z ; 2.7) медленно спадающие АКФ по координатам x и y , множество пиков АКФ значениями $\cong -0.5...+0.5$ о. е., значительная амплитуда 2-го пика по координате z ; 2.8) быстро спадающие качественные АКФ по координатам x и y , множество пиков АКФ значениями $\cong -0.15...+0.17$ о. е., значительная амплитуда второго пика по координате z ; 2.9) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами $\cong -0.7...+0.7$ о. е.; 2.10) медленно спадающие АКФ по координатам x и y , быстро спадающая АКФ по координате z , множество пиков амплитудами $\cong -0.5...+0.25$ о. е.; 2.11) медленно спадающие АКФ по координатам x и y , быстро спадающая АКФ по координате z , значительные амплитуды 3-го и 5-го пиков; 2.12) быстро спадающие АКФ по всем координатам, значительные амплитуды 2-го и 3-го пиков по координатам x и y , множество пиков АКФ значениями $\cong -0.6...+0.3$ о. е. по координате z ;

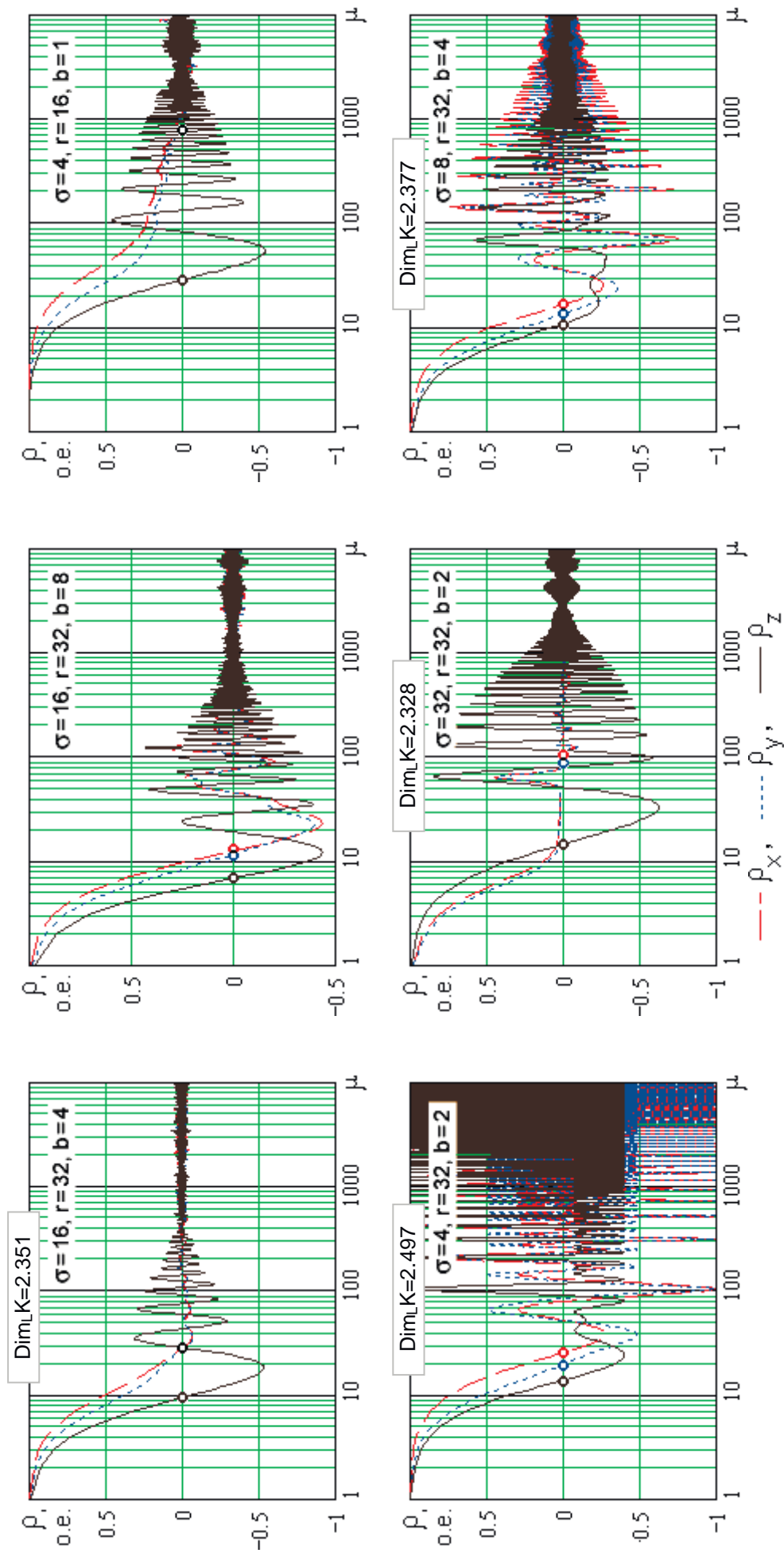


Рис. 3. Некоторые характерные автокорреляционные функции координат модели генератора Лоренца, не принятых к технической реализации в виду неудовлетворительных параметров.

2.13) быстро спадающие качественные АКФ по координатам x и y ;
2.14) быстро спадающие АКФ по всем координатам, множество пиков амплитудами $\cong -0.4 \dots +0.4$ о. е.; 2.15) быстро спадающие АКФ по всем координатам, значительные амплитуды 3-го и 5-го пиков; 2.16) АКФ по координатам x и y быстро спадают, не достигая 0, значительные амплитуды 2-го пика до первого пересечения с осью абсцисс, быстро спадающая АКФ по z , множество пиков амплитудами $\cong -0.6 \dots +0.8$ о. е.

Как правило, быстро спадающая функция автокорреляции имеет множество вторичных пиков значительных амплитуд (строки 6, 9, 12 табл. 1) и, напротив, для «гладкой» АКФ характерен медленный спад (строки 7, 10 табл. 1), что является, в принципе, естественным свойством динамических систем. В ряде случаев имеем качественные АКФ по координатам x и y , и удовлетворительные показатели – по координате z (строки 4, 13 табл. 1), что позволяет рекомендовать к изготовлению генератор с параметрическими коэффициентами, обеспечивающими данные показатели, при условии отсутствия других негативных факторов, как например, значительная дискретность траектории на внешних границах контура петель (строка 13 табл. 1). Наилучшее соотношение всех характеристик, принятых в качестве критериев отбора, обеспечивают следующие комбинации параметрических коэффициентов: $\sigma = 4$, $r = 16$, $b = 2$ (строка 4 табл. 3.1) и $\sigma = 8$, $r = 32$, $b = 2$ (строка 8 табл. 1). Оба варианта апробированы автором [1, 2, 5].

Таким образом, разработан, изготовлен и испытан генератор хаоса на основе микроконтроллера, разработана программа для микроконтроллера, отличающаяся тем, что параметрические коэффициенты и шаг интегрирования выбраны из ряда чисел $2^{\pm k}$, следовательно, операции арифметического умножения (деления) заменены логическим сдвигом операнда, что существенно ускорило расчеты и позволило моделировать влияние хаоса на нелинейные электрические цепи в «режиме реального времени».

Метрологическая оценка работы генератора динамического хаоса требует нетрадиционного подхода, поскольку он изначально вырабатывает хаотические неповторимые и заранее неизвестные сигналы, однако известными классическими параметрами можно оценить стабильность его работы, предвидеть и задать «характер» процесса детерминированного хаоса.

Получил дальнейшее развитие метод натурального, полунатурного и компьютерного моделирования на основе генератора динамического хаоса, использующего дифференциальные уравнения Лоренца и позволяющего задавать хаотические одно или двух петлевые воздействия в реальную техническую систему или ее модель одновременно по трем координатам, а также, при необходимости, применить генератор в качестве трехосевой хаотической нагрузки.

Список литературы

1. Корсун В.И. Обоснование параметров микропроцессорного генератора сигналов динамического хаоса / В.И. Корсун, Н.А. Иконникова, Алекс.А. Яланский // Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників – 2009”. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – Т. № 4. – С. 263 – 271.
2. Иконникова Н.А. Микропроцессорный генератор динамического хаоса, реализующий систему уравнений Лоренца // Материалы XIII Международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – С. 59.
3. Яланский А.А. Хаотические процессы в горных технических системах, особенности моделирования и контроля их устойчивости на основе генераторов динамического хаоса / А.А. Яланский, Алекс.А. Яланский, Н.А. Иконникова, В.В. Арестов, Т.И. Яровая // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. – № 83. – С. 194 – 205.
4. Lorenz E.N. Deterministic non-periodic flow / Lorenz E.N. – Atmos Sciences, 1963, V. 20, P. 130. [Имеется перевод в сборнике статей: Странные аттракторы (ред. Я.Г. Синай и Л.П. Шильников). – М.: Мир, 1981].
5. Иконникова Н. А. Моделирование и контроль динамических процессов в задачах оценки состояния геотехнических систем: монография / Н. А. Иконникова, В. И. Корсун, А. И. Слащев, Алекс. А. Яланский, А. А. Яланский. –Днепропетровск: НГУ, 2015. – 279 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесарєвим В.В.
Надійшла до редакції 17.01.2015*

УДК 628.337+621.355.8+661.873.23+66.087.7

© В.Л. Коваленко, В.А. Коток, А.В. Болотин

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОКСИДА НИКЕЛЯ ВЫСОКОЙ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ С ИЗУЧЕНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННОГО ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АККУМУЛЯТОРАХ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ

Предложен получение высококристаллического бета гидроксида никеля методом «выкручивания»: медленного (в течении 6 месяцев) улетучивания аммиака и распада комплексного гидроксида тетраамминникеля. Предложенным методом получены образцы $Ni(OH)_2$ и изучены электрохимические свойства путем гальвостатического зарядно-разрядного циклирования в режиме аккумулятора и суперконденсатора. Показано, что высококристаллический гидроксид никеля не может использоваться в аккумуляторах в связи с низкой электрохимической активностью. В тоже время высококристаллический гидроксид никеля проявляет высокие удельные характеристики в режиме суперконденсатора. Максимально достигнутые ёмкости составляют 120,4 мА*час/г и 276 Ф/г.

Запропоновано одержання висококристалічного бета гідроксиду нікелю методом «викручування»: повільного (протягом 6 місяців) випаровування аміаку й розпаду комплексного гідроксиду тетраамінінікелю. Запропонованим методом отримані зразки $Ni(OH)_2$ і вивчені електрохімічні властивості шляхом гальвостатичного зарядно-розрядного циклювання в режимі акумулятора й суперконденсатора. Показано, що висококристалічний гідроксид нікелю не може використовуватися в акумуляторах у зв'язку з низькою електрохімічною активністю. У теж час високок-