

# Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 621.311.25:519.816

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко

*Українська інженерно-педагогічна академія, Харків*

## МЕТОД ФРАКТАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ПРИЗНАКОВ В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

*Показаны подходы учёта влияния фрактальных свойств объёма информационного пространства технологического пространства на изменение характеристик параметров случайного информационного сигнала и предложен метод фрактального обнаружения аварийных признаков при отклонении нормированных значений характеристик параметров технологического процесса, который основывается на оценке фрактальных свойств структуры объёма фазового информационного пространства при прохождении через него случайных информационных сигналов на основе количественных и качественных изменений фрактальных и информационных размерностей, а также показано, что в хаотических случайных системах изменение объёма информационного пространства пропорционально изменению энергии сигнала в данном объёме и возможные потери энергии связаны с изменением размерности в фрактальных структурах кластер-кластерных агрегаций трёхмерного фазового пространства.*

**Ключевые слова:** случайный фрактальный сигнал, объём информационного пространства технологического процесса, фрактальная и информационная размерность, фрактальная структура.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

В электроэнергетических системах, являющихся сложными техническими энергообъектами, определяющую роль играет их структура, в виде динамической системы, которая характеризуется своим начальным состоянием и детерминированным законом, по которому система переходит из начального состояния в другое, т.е. возникают системы с дискретным или непрерывным временем и сопровождаются динамическим хаосом (хаотическими явлениями), при этом, возникает явление, характеризующееся случайным поведением нелинейной системы, несмотря на то, что оно определяется детерминистическими законами, и по сути, являются нелинейной системой с протекающими процессами, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями [7 – 9].

В специальной и научно-технической литературе [7, 11], решение проблем управления системами динамического хаоса, рассмотрены и решаются на основе таких базовых моделей, как Чуа, Лоренца и Ресслера [7, 11], в которых описываются хаотические случайные динамические системы. Кроме того, как показано в работах [7, 11], для управления хаосом используют такие методы: метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, основанного на введении в пространство состояний

синтезируемых систем притягивающих (инвариантных) многообразий – аттракторов, на которых наилучшим образом согласуются только естественные свойства (физические, химические) объекта и требования задач управления; метод обнаружения режимов детерминированного хаоса, на основе обнаружения отклонений угловой частоты и напряжения от номинального значения и диссипации энергии, протекающих из-за наличия глобальной хаотической динамики на энергообъектах.

Как показал анализ методов [7 – 11], рассмотренных выше, в них не учитываются неоднородные свойства их неустойчивых структур с динамическим хаосом в пространстве и времени (в режиме реального времени), что может привести к потере информации о неисправностях и авариях на энергообъектах с хаотической динамикой протекания технологических процессов. В работах [1 – 7], показано, что исследование сложных энергетических систем, как правило, проводят путем представления энергообъектов в виде взаимосвязанных составных частей, анализа их функций и задач для дальнейшего изучения взаимодействия всех элементов, входящих в их состав. Такой подход предполагает создание развитого математического аппарата для адекватной обработки имеющейся информации о характеристиках параметрах технологического процесса.

Однако, как показывает теория синергетического подхода с элементами фрактально-кластерной

теории [8,9], не всегда функции и задачи всей системы повторяются в ее составных частях: подсистемах и элементах, что приводит к потере информации в объеме информационного пространства технологического процесса.

В работах [1 – 6], авторами, исследовано поведение динамических систем и получены результаты, которые подтверждают, что их структуры, обладают фрактальными свойствами и зависят от внешних управляющих параметров. Это обстоятельство раскрывает основы возникновения таких явлений, как динамический хаос, в результате которого происходят случайные процессы (т.е. сценарии нештатных аварийных ситуаций), что приводит к возникновению хаотических режимов.

**Целью статьи** является разработка методов фрактального обнаружения признаков аварийности в информационном пространстве технологического процесса на основе исследования потерь энергии хаотических случайных сигналов с использованием элементов фрактально – кластерной теории.

### Основной материал

Рассмотрим зависимость изменения объема информационного пространства  $V_0$  от изменения пространственных координат в режиме реального времени.

В работах [1 – 6], авторами было предложено исследовать характер изменения сигналов информационного пространства на основе элементов теории фракталов и было получено, что в хаотических случайных системах возможны потери энергии случайного сигнала  $E_0$ , и такую систему (процесс) было принято считать диссипативной, в которой с уменьшением объема  $V_0$  уменьшается энергия  $E_0$ , как показано на рис. 1. Из рис. 1, б видно, что меняется степень заполнения объема информационного пространства  $V_0$  на величину  $\Delta V$ , которая пропорциональна изменению энергии сигнала  $\Delta E$  в данном объеме. Поэтому изменение объема информационного пространства тождественно изменению энергии  $\Delta V \sim \Delta E$ .

Как было установлено [1 – 6], объем информационного пространства  $V_f$  обладает фрактальными свойствами и степень заполнения его информационного пространства характеризуется количественной величиной фрактальной размерностью  $d_f$ . Следовательно, можно сделать вывод, что и изменение энергии случайного сигнала  $\Delta E$ , проходящего через фрактальный объем  $V_f$  в режиме реального времени, также связано с количественной величиной –  $d_f$ , характеризующей степень заполнения объема информационного пространства (ИП)  $V_f$ . Как известно [10], и исходя из вышесказанных предполо-

жений, получим выражение для определения объема, описываемого сферой  $V_0$ :

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r_0^3. \quad (1)$$

Необходимо обратить внимание на то, что изменение евклидового объема  $V_0$  зависит от изменения радиуса  $r_0$ , а в особенности его степенного показателя, как известно [10], равному в евклидовом пространстве значению три ( $r_0^3$ ).

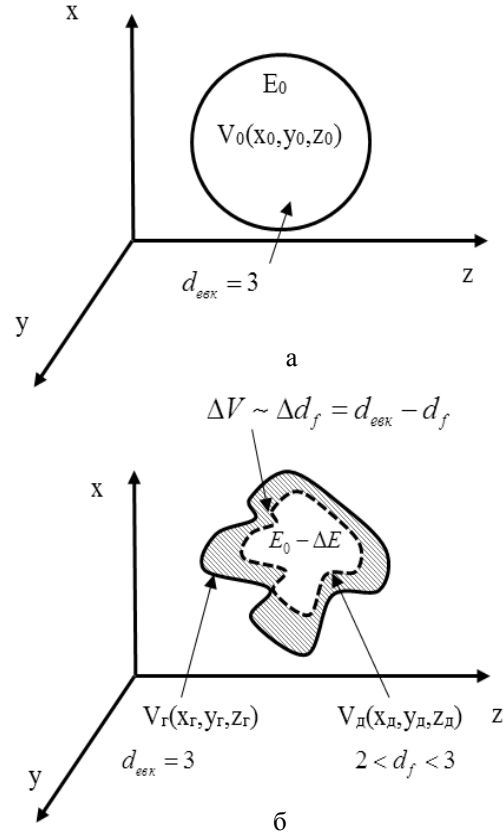


Рис. 1. Процесс изменения энергии в объеме фазового трехмерного информационного пространства:  
 а – исходный (начальный объем фазового информационного пространства  $V_0$  в начальный момент времени  $t_0$  и соответствующая ему энергию  $E_0$ ;  
 б – объем фазового пространства гамильтоновой  $V_f$  и диссипативной  $V_d$  систем в момент времени  $t_1$  и соответствующая ему энергию  $E_0 - \Delta E$

Из этого следует, что для исследования изменения энергии случайного сигнала  $\Delta E$ , проходящего через объем  $V_f$  в режиме реального времени, необходимо установить связь изменения среднего значения радиуса корреляции  $\Delta r_{cp}$  объема информационного пространства  $V_f$  от изменения фрактальной размерности  $\Delta d_f$ . Как известно, в работе [5], авторами была получена следующая зависимость для изменения среднего значения радиуса корреляции  $\Delta r_{cp}$  (2):

$$\Delta r_{cp} = r_{2cp.p.кл} - r_{1cp.p.кл}. \quad (2)$$

Необходимо также отметить, что при изменении среднего радиуса корреляции  $\Delta r_{cp}$  происходит изменение степени заполнения объема информационного пространства на величину  $\Delta V = V_0 - V_f$  ( $V_f$  - объем информационного пространства с фрактальными свойствами), следовательно, происходит изменение евклидовой размерности  $d_3 = 3$  на величину  $\Delta d$ . Откуда следует, что степень заполнения объема информационного пространства характеризуется фрактальной размерностью  $d_f$ , которая определяется выражением (3):

$$d_f = d_3 - \Delta d. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что изменение радиуса корреляции  $\Delta r_{cp}$  тождественно изменению степени заполнения объема информационного пространства  $\Delta d$  в режиме реального времени, т.е.  $\Delta r_{cp} \equiv \Delta d$ . Следовательно, в отличие от евклидоваго объема ( $r_0^3$ ), радиус для фрактального объема  $V_f$  информационного пространства  $r_f$ , может меняться в зависимости от изменения фрактальной размерности в пределах  $2 < d_f < 3$ , а, следовательно, выражение (1) можно представить в таком виде:

$$V_f = \frac{4}{3} \pi r_f^{d_3 - \Delta d} = \frac{4}{3} \pi r_f^{d_f}. \quad (4)$$

В работах авторов [1-6] показано, что кластер – кластерная агрегация (ККА) фрактального объема  $V_f$  информационного пространства с локальной информационной неоднородностью (ЛИН), обладает фрактальными свойствами, т.е. геометрические расстояния  $l_{кка}^{геом}$  (среднее расстояние между кластерами различных ККА) и  $l_{кл}^{геом}$  (среднее расстояние между кластерами внутри ККА) отличаются от евклидовых на  $\Delta l$  и являются фрактальными длинами соответственно  $l_{фкл}$  и  $l_{фкка}$ , как показано на рис. 2.

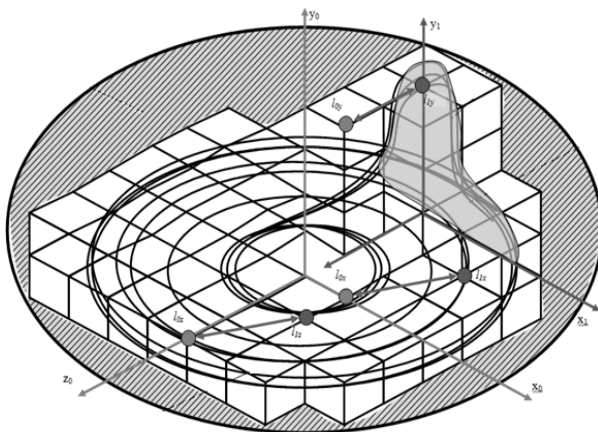


Рис. 2. Вариант построения структуры физической модели трехмерного фазового объема информационного пространства

Как видно на рис. 2 изменение фрактальных длин  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$  эквивалентно изменению пространственных координат  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , следовательно можно сделать допущение, что изменение радиуса  $r_f$  для фрактального объема информационного пространства  $V_f$  приблизительно равно изменению фрактальных длин  $l_f$  фрактального объема  $V_f$ , т.е.  $r_f \approx l_f$ , а, следовательно, радиус  $r_f$  можно выразить через изменение фрактальных длин  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$  и выражение (4) можно представить как

$$V_f = \left( \sqrt{(\ell_{x1} - \ell_{x0})^2 + (\ell_{y1} - \ell_{y0})^2 + (\ell_{z1} - \ell_{z0})^2} \right)^{d_f} \times (4\pi/3) = (4\pi/3) \left( \sqrt{\Delta \ell_x + \Delta \ell_y + \Delta \ell_z} \right)^{d_f}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует вывод, что фрактальный объем информационного пространства  $V_f$ , зависит от изменения фрактальных длин  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$ , как показано в работе [5], длины  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$  связаны со средним расстоянием между кластерами различных ККА  $l_{кл}$  и средним расстоянием между кластерами, внутри ККА  $l_{кка}$ , т.е.  $l_{фкл} = l_{кл} + \Delta l_{кл}$ , а  $l_{фкка} = l_{кка} + \Delta l_{кка}$ .

Как было исследовано в работе [5], это обстоятельство позволяет определять признаки сигналов, проходящих через фрактальный объем трехмерного фазового пространства, а именно: отсутствие сигналов с признаками аварийности при полном заполнении объема  $V_0$  ИП при  $l_{кка} = l_{фкка}$  и  $l_{кл} = l_{фкл}$ , т.е. при отсутствии  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$ ; признак аварийности при наличии  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$ .

Так как, процесс изменения информационных сигналов исследуется в пространстве и времени, то изменение радиуса  $r_0$  во времени целесообразно представить не в виде изменения фрактальных длин  $\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$ , а в виде изменения пространственных координат  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ .  $(x_0 \dots x_1, y_0 \dots y_1, z_0 \dots z_1)$ , а именно  $r_0 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}$ .

С учетом изменения пространственных координат  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , тогда фрактальный объем  $V_f$  может определяться выражением (6):

$$V_f = \left( \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \right)^{d_3 - \Delta d} \times (4\pi/3) = t_0 \left( \sqrt{\Delta x + \Delta y + \Delta z} \right)^{d_f}. \quad (6)$$

Таким образом, из выражения (6) следует вывод, что фрактальный объем информационного пространства  $V_f$ , зависит от степенного показателя  $d_f$  изменения пространственных координат  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ .

С другой стороны, необходимо отметить, что фрактальный объем информационного пространства

$V_f$  характеризується кількісною величиною – інформаційною розмірністю  $d_I$ , котра, як показано в роботі [11] для багатьох стандартних странных аттракторів, збігається з кореляційною  $d_{кор}$  і ємкісною  $d_c$  розмірностями інформаційного простору. Откуда следует, что любые изменения корреляционных величин ( $r_{кор}$  – радиус корреляции,  $\ell_{кор}$  – корреляционные длины) и изменения геометрических размеров площади сечения странных аттракторов  $S_{атр}$ , которые являются геометрической мерой, учитывающей частоту  $\omega_{сиг}$ , с которой случайный сигнал проходит траекторию движения в трехмерном фазовом объеме информационного пространства  $V_f$ , оказывают существенное влияние и вызывают изменение корреляционной размерности  $d_{кор}$ , а, как известно [11]  $d_{кор}$  для стандартных странных аттракторов, которыми в нашем случае являются ККА, ограничивают емкость информации в объеме  $V_f$  и  $d_{кор} \approx d_I$ .

Как известно [11], для малых размеров площади сечения странных аттракторов  $S_{атр}$  ККА, информационная размерность  $d_I$  связана с количеством информации объема информационного пространства  $I$  следующим выражением (7):

$$I_{S_{атр}} \approx d_I \log_2(1 / S_{атр}). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что количество информации  $I_{S_{атр}}$ , которая проходит через сечение странного аттрактора  $S_{атр}$  ККА, зависит от изменения информационной размерности  $d_I$  и изменения площади аттрактора  $S_{атр}$ , при этом, при меньшей площади  $S_{атр}$  происходят малые потери энергии  $\Delta E$  и количество информации  $I_{S_{атр}}$  увеличивается. Следовательно изменение энергии  $\Delta E$  в объеме информационного пространства  $V_f$  зависит от размеров сечения странного аттрактора  $S_{атр}$  ККА, которая характеризует количество потери информации.

Как показали исследования, в работах [5, 11] представлены различные размерности ( $d_f, d_I, d_{кор}$ ), характеризующие одну и ту же ЛИН объема информационного пространства  $V_f$ , которая фактически является «неоднородным» отображением Пуанкаре (с площадью аттрактора  $S_{атр}$ ), следовательно, при исследованиях принимаем следующие допущения [11]:  $d_f \approx d_I \approx d_{кор}$ . Согласно [11], фрактальная размерность  $d_f$  для объема  $V_f$  вычисляется по формуле:

$$d_f = d_3 \cdot 2^{\lambda(T_f - T_{ц})} \quad (8)$$

где  $\lambda = \ln 2 \left| \overline{\Delta I} \right|$  – показатель Ляпунова.

В формуле (8) наблюдается изменение фрактальной размерности  $d_f$  площади странного аттрактора  $S_{атр}$  диссипативной хаотической системы в степенной зависимости от изменения количества информации  $\Delta I_f$  в интервале времени  $\tau + \Delta T$ , где проявляются фрактальные свойства, т.к.  $\Delta T = T_f - T_{ц}$ . Для физического понимания процесса изменения количества информации  $\Delta I_f$  введем допущение, что время возврата  $\tau$  фактически является фрактальным временем  $T_f$  и характеризуется количественной величиной фрактальной размерности времени  $t_f$ . Поэтому, характеристики параметров могут принимать нормированные значения при  $\Delta I_f = 0$  или ненормированные значения при  $\Delta I_f = 1$  и с учетом времени при  $T_{ц} = \tau$  – нормированные параметры,  $T_{ц} > \tau$  – ненормированные параметры. Т.е. можно сделать вывод об условиях возникновения признаков аварийности в информационном пространстве:

$$\begin{cases} \Delta I_f = 1 \rightarrow T_{ц} > \tau; \\ \Delta I_f = 0 \rightarrow T_{ц} = \tau. \end{cases} \quad (9)$$

С учетом вышесказанного, выражение для нахождения фрактальной размерности  $d_f$  для объема  $V_f$  будет иметь следующий вид (10):

$$d_f = d_3 \cdot 2^{\ln 2 \left| \overline{\Delta I} \right| (\tau + \Delta T)}, \quad (10)$$

где  $d_3 = 3$  (евклидова размерность),  $\left| \overline{\Delta I} \right| = [0, 1]$ .

Таким образом, подставляя выражение (10) в формулу (6) для определения величины фрактального объема  $V_f$  получаем выражение (11), из которого видно, что изменение объема информационного пространства с фрактальными свойствами  $V_f$ , зависит от изменения пространственных координат ( $\Delta x + \Delta y + \Delta z$ ) в степенной зависимости от степени заполнения евклидова объема  $V_0$  количеством информации проходящей через площадь сечения странных аттракторов  $S_{атр}$  в течение интервала времени  $\tau + \Delta T$  и характеризующейся информационной размерностью  $d_I$ ;

$$V_f = \frac{4}{3} \pi \left( \sqrt{\Delta x + \Delta y + \Delta z} \right)^{d_3 \cdot 2^{d_I \cdot \left| \ln S_{атр} \right| (\tau + \Delta T)}}. \quad (11)$$

Таким образом, выражение (11) позволяет обнаруживать признаки аварийности информационных сигналов в объеме информационного пространства при отклонении от нормы характеристик технологических параметров технологического процесса в режиме реального времени. Кроме того, на основании выше изложенного утверждения, что изменение объема информационного пространства  $\Delta V$

пропорціонально изменению энергии сигнала  $\Delta E$  в данном объеме, можно сделать вывод, что в хаотических случайных системах возможные потери энергии  $E$  связаны с изменением различных размерностей ( $d_f$ ,  $d_1$ ,  $d_{кор}$ ,  $d_c$ ) в фрактальных структурах трёхмерного фазового пространства.

## Выводы

1. Предложен метод фрактального обнаружения аварийных признаков при отклонении нормированных значений характеристик параметров технологического процесса, который основывается на оценке фрактальных свойств структуры объема фазового информационного пространства при прохождении через него случайных информационных сигналов на основе количественных и качественных изменений фрактальных и информационных размерностей.

2. Показано, что в хаотических случайных системах изменение объема информационного пространства  $\Delta V$  пропорционально изменению энергии сигнала  $\Delta E$  в данном объеме и возможные потери энергии  $E$  связаны с изменением размерности в фрактальных структурах кластер-кластерных агрегаций трёхмерного пространства.

## Список літератури

1. Буданов П.Ф. Анализ современного состояния и перспективы развития автоматизированных систем по подготовке оперативного персонала АЭС / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко, М.Ю. Сахно // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 9(107). – С. 263-269.
2. Буданов П.Ф. Синергетический подход к разработке модели принятия решения оперативным персоналом

АЭС в нештатных ситуациях / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1(108). – С. 256-262.

3. Буданов П.Ф. Метод кластерного анализа для обработки информационного пространства в автоматизированных тренажерах по подготовке оперативного персонала АЭС / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 2(109). – С. 106-111.

4. Моделирование нештатных аварийных ситуаций на энергообъектах на основе фрактально-кластерного подхода / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко, А.М. Чернюк, К.А. Солод, Т.П. Руденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 1 (132). – С. 15-21.

5. Буданов П.Ф. Моделирование признаков аварийности параметров технологического процесса объектов электроэнергетики / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2(43). – С. 84-88.

6. Буданов П.Ф. Просторово-часовая модель информационного пространства с фрактальной структурой / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 2(109). – С. 15-19.

7. Управляемые хаос в установившихся режимах электроэнергетических систем / Е.П. Жиленко, С.Ю. Прусс, Н.Ю. Фоменко, Д.Е. Христин // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 184-191.

8. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

9. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: ИКИ, 2002. – 656 с.

10. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / В.К. Балханов. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. – 224 с.

11. Мун Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

Поступила в редколлегию 1.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

## МЕТОД ФРАКТАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ АВАРІЙНИХ ОЗНАК В ІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко

Показані підходи обліку впливу фрактальних властивостей об'єму інформаційного простору технологічного простору на зміну характеристик параметрів випадкового інформаційного сигналу і запропоновано підхід фрактального виявлення аварійних ознак при відхиленні нормованих значень характеристик параметрів технологічного процесу, який ґрунтується на оцінці фрактальних властивостей структури об'єму фазового інформаційного простору при проходженні через нього випадкових інформаційних сигналів на основі кількісних і якісних змін фрактальних та інформаційних розмірностей, а також показано, що в хаотичних випадкових системах зміна об'єму інформаційного простору пропорційна зміні енергії сигналу в даному об'ємі і можливі втрати енергії пов'язані зі зміною розмірності у фрактальних структурах кластер-кластерних агрегацій тривимірного фазового простору.

**Ключові слова:** випадковий фрактальний сигнал, об'єм інформаційного простору технологічного процесу, фрактальна та інформаційна розмірність, фрактальна структура.

## DETECTION METHOD OF FRACTAL CHARACTERISTICS OF EMERGENCY IN THE INFORMATION SPACE PROCESS

P.F. Budanov, K.Y. Brovko

Showing approaches taking into account the effect of the fractal properties of the volume of information space technology space to change the characteristics of the parameters of the random data signal and the approach of the fractal detection of emergency signs rejecting normalized values of performance parameters of the process, which is based on an assessment of the fractal properties of the structure of the volume of the phase information space while passing through random information signals on the basis of quantitative and qualitative changes of fractal and informational dimensions, and also shows that in the chaotic random systems change in the volume of information space in proportion to the signal energy in a given volume, and the possible loss of energy associated with the change of dimension in the fractal structure of the cluster-cluster aggregation of three-dimensional phase space.

**Keywords:** random fractal signal, the amount of information space of the process, and information fractal dimension, fractal structure.