

УДК 621.311.25 : 519.816

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ВЛИЯНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА С ПРИЗНАКАМИ АВАРИЙНОСТИ

*Показано, что информационное пространство технологического процесса можно представить как диссипативную систему, в которой при изменении объема трехмерного фазового информационного пространства технологического процесса энергообъекта обязательно следует изменение энергии и мощности сигнала, которые связаны с изменением частоты случайного сигнала, поэтому предложено найти пространственно-временную зависимость изменения частоты сигнала с учетом фрактальных свойств трехмерного объема фазового информационного пространства, таких как фрактальное время и фрактальная размерность времени, и получены зависимости электрических характеристик случайного фрактального сигнала, таких как мощность, энергия и частота от геометрических элементов фрактальной структуры, через которую проходит случайный сигнал.*

**Ключевые слова:** случайный фрактальный сигнал, фрактальное время, фрактальная размерность времени, объем информационного пространства технологического процесса.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

Современный этап развития систем передачи информации на энергообъектах (ЭО) характеризуется усиленной разработкой и широким применением класса хаотических, а в особенности случайных сигналов (СХС), которые имеют специфические свойства изменять свои характеристики в информационном пространстве в режиме реального времени [9]. Процессы, точные законы которых не могут быть использованы для их описания, мы вынуждены рассматривать как случайные. Следовательно, название «случайный» носит в определенном смысле временный характер, поскольку процесс перестает быть случайным, как только для его описания можно использовать точные законы, которым он подчиняется. Таким образом, всякий сигнал при определенных обстоятельствах может быть рассмотрен как случайный, в то же время шум может содержать много информации.

Явление, которое порождает случайные процессы, вызывает проблемы, которые неразрешимы теоретически (из-за соотношения неопределенностей) и практически (из-за огромного числа одновременно решаемых уравнений). Любая передача информации связана с передачей энергии. При любом измерении объект измерения теряет часть энергии, снимаемой измеряемым устройством. Следовательно, понятие мощности сигнала является чрезвычайно важным.

В задачах обнаружения и распознавания хаотических СХС, важную роль играет своевременное определение отклонений изменения их характеристик

от нормированных характеристик классических случайных сигналов [9].

Поэтому возникает актуальная проблема в усовершенствовании или поиске новых методов анализа и обработки, хаотических СХС на основе специфических количественных характеристик, в виде которых, в работе, авторами предлагается использовать количественную характеристику степени заполнения объема информационного пространства – фрактальная размерность  $d_f$  [12]. Это позволяет качественно описать случайные хаотические сигналы и изменения их характеристик в пространстве и времени с учетом фрактальных свойств в объеме информационного пространства технологического процесса ЭО.

Как известно [9], случайный хаотический сигнал, рассматривается как временный процесс, имеющий начальное  $T_0$  и конечное  $T_k$  состояния времени, определяющий длительность сигнала равной времени протекания цикла технологического процесса  $T_{ц}$ , в пределах которого происходит изменение характеристик данного сигнала.

Следует обратить внимание на то, что основная энергия сигнала сосредоточена на определенном диапазоне частот, что и определяет ширину спектра сигнала, который, как правило, сокращают исходя их допустимых искажений сигнала, что вносит отклонение характеристик СХС от нормы.

Для общего представления о возможностях множества сигналов для передачи информации (сообщений) в теории и практике, как известно [9], в качестве общей характеристики применяют объем сигнала  $V_c$ , который зависит от длительности сиг-

нала  $T_{ц}$ , динамического диапазона  $D_c$  и ширины спектра  $F_c$ , а именно  $V_c = T_{ц} \cdot F_c \cdot D_c$ . В работах [8, 12] отмечается, что возрастание информации (за счет хаоса и случайности) приводит к увеличению объема сигнала, однако затрудняет передачу сигнала в режиме реального времени.

Поэтому можно сделать вывод, что отношение объема классического сигнала  $V_c$  к объему, за счет хаоса и случайности  $V_{cf}$ , носит степенную зависимость, а именно  $V_{cf} = V_c^{d_f}$ , а в физическом смысле это означает, что формирование объема случайных хаотических сигналов  $V_{cf}$  происходит за счет искаженных характеристик сигналов (отличных от нормированных), а также зависит от изменения фрактальной размерности  $\Delta d_f$  объема информационного пространства  $V_f$ . Если среда неоднородная и обладает фрактальными свойствами, то степенная характеристика сохраняется, но меняется степенной показатель. Необходимо этот показатель выразить через фрактальную размерность, которая показывает степень заполнения объема информационного пространства  $V_f$ .

Поэтому авторами в работе предложено рассмотреть характер динамики изменения характеристик технологических параметров в зависимости от времени протекания от технологического цикла к циклу, как сложную динамическую модель, которая предполагает определение изменения фазового портрета странного аттрактора кластер-кластерной агрегации в трехмерном объеме фазового информационного пространства технологического процесса энергообъекта.

**Целью статьи** является определение влияния фрактальных свойств объема информационного пространства на процесс формирования случайного сигнала с признаками аварийности с учетом изменения фрактального времени и фрактальной размерности времени.

## Основной материал

В работе [5] авторами были исследованы свойства странного аттрактора, и показано, что его площадь обладает фрактальными свойствами, т.е. имеет фрактальную структуру.

Кроме того, согласно теореме Пуанкаре – Бендиксона [12], странный аттрактор может проявляться в непрерывной трехмерной динамической системе, что отвечает начальным условиям при исследовании объема фазового информационного пространства  $V_f$ .

Как известно [12], информационное пространство можно представить как диссипативную систему, следовательно, при изменении объема фазового информационного пространства  $\Delta V_f$ , как правило,

следует изменение (уменьшение) энергии, т.е. процесс исследования заключается в нахождении изменения мощности  $P(t)$  и энергии  $E(t)$  сигнала от изменения фрактальной размерности  $\Delta d_f$  во времени, т.е.  $P_0 - P_f = \Delta P \rightarrow \Delta d_f$ ;  $E_0 - E_f = \Delta E \rightarrow \Delta d_f$ . В то же время, следует отметить, что  $P(t)$  и  $E(t)$  зависят от изменения частоты во времени  $\omega(t)$ . Следовательно, важно найти зависимость изменения частоты во времени от пространственно-временных параметров информационного пространства, таких как объем  $V_f$ , пространственные координаты  $x, y, z$ , критические расстояния  $l, l_0$  в структурах кластер – кластерных агрегациях, как рассмотрено в статье [5], т.е. зависимость электрофизических характеристик от геометрических элементов фрактальной структуры объема фазового информационного пространства  $V_f$ .

Для физического понимания изменения характеристик технологических параметров в интервале времени от  $T_{ц0}$  до  $T_{ц1}$ , т.е. определения отклонения значения времени  $\Delta T$  от установленных нормированных значений, авторами в работах [1 – 7] было установлено, что изменение времени  $\Delta T$  обладает фрактальными свойствами, откуда следует, что  $T_{ц1} + \Delta T \approx T_f$  и характеризуется количественной величиной фрактальной размерностью времени  $t_f$ .

Поясняя природу возникновения фрактального времени  $T_f$ , необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства: момент возникновения фрактального времени  $T_f$  при условии  $T_{ц1} + \Delta T \approx T_f \sim \tau_{возв}$ ; моментом возникновения фрактального времени  $T_f$  является процесс отклонения ХПП от нормированных значений и их длительность определяется временем возврата Пуанкаре  $\tau_{возв}$  в область окрестности начального состояния  $Q_0(x_0, y_0, z_0)$  площади сечения аттрактора  $S_{атр}$  [1 – 7].

Откуда следует, что время возврата  $\tau_{возв}$  определяется от величины  $T_{ц1} + \Delta T$  в степенной зависимости от фрактальной размерности времени  $t_f$ , т.е.

$$\tau_{возв} = T_{ц}^{t_f}.$$

Необходимо отметить, что согласно [11], фрактальная размерность времени  $t_f$  может меняться в пределах  $0 < t_f < 1$ , а исследования авторов в работе [6] показали следующую закономерность: при уменьшении значения величины размерности времени  $t_f$ , время возврата  $\tau_{возв}$  стремится к  $T_{ц} = 1$ , т.е.  $\tau_{возв} \rightarrow 1$ ; при увеличении  $t_f$ ,  $\tau_{возв} \rightarrow 0$ . Это обстоятельство указывает на то, что величина  $\Delta T$  явля-

ется сравнительно малой по сравнению с  $\tau_{\text{возв}}$ , поэтому, многими исследователями в работах [11] фрактальная размерность времени для электромагнитных процессов  $t_f = 1$  и, как правило, его не используют в расчетах и моделях по определению характеристик СХС, что вносит погрешности при расчетах электрофизических величин, таких как, энергия  $E(t)$ , мощность  $P(t)$  и частота случайного сигнала  $\omega(t)$ .

Рассмотрим зависимость электрофизических величин  $(E, P, \omega)$  от фрактального времени  $T_f$  и фрактальной размерности времени  $t_f$ .

Рассмотрим зависимость изменения частоты  $\omega_0$  СХС от фрактального времени  $T_f$ .

В начале определим зависимость изменения частоты  $\omega_0$  от времени цикла  $T_{\text{ц}}$  (1):

$$\omega_0 = 2\pi \frac{1}{T_{\text{ц}}} . \quad (1)$$

Делая допущение, что цикл технологического процесса протекает во времени в фрактальном объеме информационного пространства  $V_f$ , тогда получаем зависимость времени цикла  $T_{\text{ц}}$  от величины фрактального времени  $T_f$  (или времени возврата –  $\tau_{\text{возв}}$ ) и корня в степени в виде фрактальной размерности времени  $t_f$  (2):

$$T_{\text{ц}} = t_f \sqrt[t_f]{\tau_{\text{возв}}} . \quad (2)$$

Откуда, подставляя выражение (2) в (1), получим значение частоты  $\omega_f$  для фрактального объема  $V_f$  фазового трехмерного информационного пространства в следующем виде (3):

$$\omega_f = 2\pi \frac{1}{t_f \sqrt[t_f]{\tau_{\text{возв}}}} . \quad (3)$$

Сравнивая выражения (2) и (3), получим приращения значения частоты  $\Delta\omega$  в следующем виде (4):

$$\Delta\omega = \omega_0 + 2\pi \frac{1}{t_f \sqrt[t_f]{\tau_{\text{возв}}}} . \quad (4)$$

Как известно [8], полезный сигнал описывается выражением (5):

$$s(t) = U_m \cos(\omega_0(t) + \varphi_0) , \quad (5)$$

где  $U_m$  – амплитуда;  $\omega_0$  – угловая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза сигнала.

Для оценки признаков аварийности авторами было предложено использовать элементы теории фракталов, т.е. фрактальные свойства сигналов, а в особенности изменения частоты  $\omega_0(t)$  с учетом фрактального времени  $T_f$  и фрактальной размерности времени  $t_f$ .

Таким образом, полезный сигнал с фрактальными свойствами можно описать выражением (6):

$$s_f(t) = U_m \cos \left( 2\pi \frac{1}{t_f \sqrt[t_f]{\tau_{\text{возв}}}} + \varphi_0 \right) . \quad (6)$$

Исходя из выражений (5), (6), видно, что сигнал (6) самоподобен сигналу (5), поэтому авторами предложено проводить сравнительный анализ полезного сигнала (5) с (6), который несет количество информации  $I_{S_{\text{атр}}}$ , проходящего через сечение странного аттрактора  $S_{\text{атр}}$  кластер – кластерной агрегации (ККА) фрактального объема  $V_f$  трехмерного фазового информационного пространства и оценивать количество потери информации  $\Delta I$ .

В работе [7] был предложен метод фрактального обнаружения аварийных признаков в информационном пространстве технологического процесса, где фрактальный объем  $V_f$  определяется выражением (7):

$$V_f = \frac{4}{3} \pi \left( \sqrt{\Delta x + \Delta y + \Delta z} \right)^{d_3 \cdot 2^{d_1} \cdot |\ln S_{\text{атр}}| (T_f - T_{\text{ц}})} , \quad (7)$$

где количество потерь информации  $\Delta I = d_1 \cdot |\ln S_{\text{атр}}|$ .

Решая обратную задачу по оценке количества потерь информации  $\Delta I$ , преобразуем выражение (7) в (8) и получим следующую функциональную зависимость:

$$|\Delta I| = f(\Delta T_f, \Delta V_f, \Delta x + \Delta y + \Delta z)^{\Delta d_f} , \quad (8)$$

где  $\Delta d_f$  – приращение фрактальной размерности в трехмерном фазовом пространстве.

Из выражения (8) видно, что потери информации  $\Delta I$  зависят: от изменения времени  $\Delta T = T_f - T_{\text{ц}}$ , а именно, при  $\Delta T \rightarrow 0$  потери максимальны –  $\Delta I_{\text{max}}$ , при  $\Delta T \rightarrow 1$  потери минимальны –  $\Delta I_{\text{min}}$ ; от изменения пространственных координат  $(\Delta x + \Delta y + \Delta z)$  фрактального объема информационного пространства  $\Delta V_f$  и от степенной зависимости изменения фрактальной размерности  $\Delta d_f$ , при исследовании которой была получена следующая закономерность, что с уменьшением фрактальной размерности  $d_f$  от евклидова объема  $d_3 = 3$  до площади  $d_2 = 2$ , потери информации  $\Delta I$  увеличиваются.

С использованием программы MathCad были проанализированы числовые значения формул (5) и (6) и показаны зависимости изменения величины амплитуды сигнала от фрактального времени  $T_f$ . На графике рис. 1, а, б показано, что в фрактальном информационном пространстве изменение параметров сигнала самоподобно первоначальной форме, и оценивается количественной величиной – фрактальной размерностью  $t_f$  фрактального времени  $T_f$ :

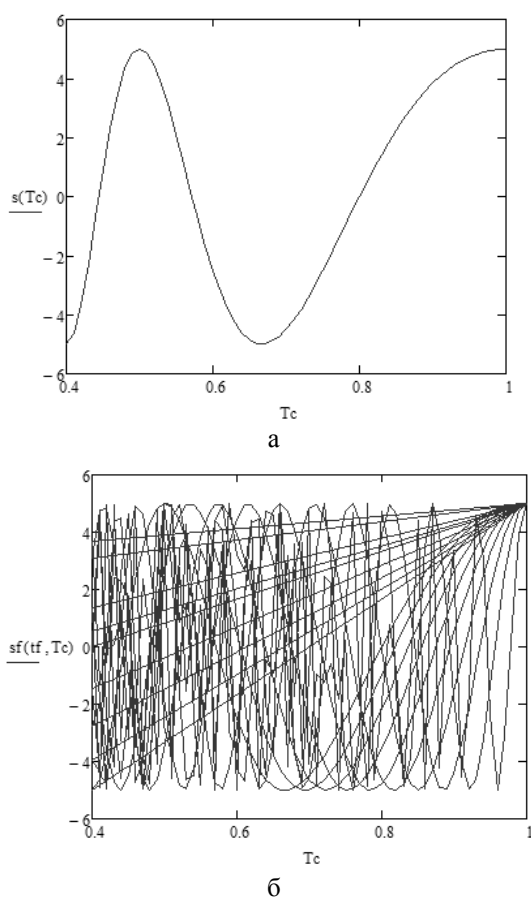


Рис. 1. Графики зависимости амплитуды сигнала от времени: а – сигнал первоначальной формы; б – фрактальный сигнал с фрактальным временем  $T_f$

Рассмотрим зависимость параметров сигнала, а именно энергии  $E(t)$  и мощности  $P(t)$  от фрактальных свойств объема  $V_f$  трехмерного фазового информационного пространства. Соотношение между временным и частотным соотношением сигнала наиболее полно можно представить «временной» и «частотной» мощностью. Рассмотрим мощность, как функцию от времени  $P(t)$  (рис. 2, а) и как функцию от частоты  $S(\omega)$  (рис. 2, б).

Средняя мощность на промежутке длиной  $\Delta T = \tau_{\text{возв}} - T_{\text{цп}}$  рассчитывается по формуле (9):

$$P(t_0, \Delta T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} [s(t)]^2 dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} \left[ U_m \cos \left( 2\pi \frac{1}{t_f \sqrt{\tau_{\text{возв}}}} + \varphi_0 \right) \right]^2 dt. \quad (9)$$

Энергия сигнала  $E(t)$  равна интегралу от мощности по всему временному промежутку существующего сигнала, т.е. в интервале времени  $T_{\text{цп}} + \Delta T \approx T_f \sim \tau_{\text{возв}}$ , откуда следует, что  $\Delta T = \tau_{\text{возв}} - T_{\text{цп}}$ .

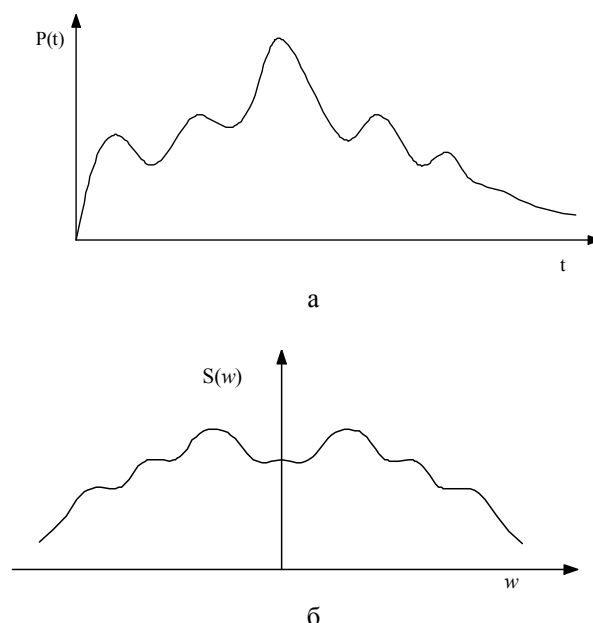


Рис. 2. Графики зависимости мощности от времени  $P(t)$  (а) и от частоты  $S(\omega)$  (б)

Поэтому, на данном интервале от  $t_0$  до  $\Delta T$  в окрестности площади аттрактора  $S_{\text{атр}}$  энергия случайного сигнала вычисляется по формуле (10):

$$E(t_0, \Delta T) = \int_{t_0 - \frac{\Delta T}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta T}{2}} |s(t)|^2 dt = \int_{t_0 - \frac{\Delta T}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta T}{2}} U_m \cos \left( 2\pi \frac{1}{t_f \sqrt{\tau_{\text{возв}}}} + \varphi_0 \right) dt. \quad (10)$$

Таким образом, в выражениях (9), (10) фрактальная размерность времени  $t_f$  и время возврата  $\tau_{\text{возв}}$  характеристик параметров технологического процесса являются основной количественной оценкой для определения признаков аварийности в случайных хаотических сигналах при прохождении их через фрактальную структуру странного аттрактора с площадью  $S_{\text{атр}}$  фрактального объема трёхмерного информационного пространства.

### Выводы

1. Определено влияние фрактальных свойств структуры объема трёхмерного фазового информационного пространства на процесс формирования случайного сигнала с признаками аварийности с учетом изменения фрактального времени и фрактальной размерности времени.

2. Получены новые аналитические выражения для определения пространственно-временной зави-

симости электрофизических параметров случайного сигнала: мощности, энергии и частоты от геометрических элементов фрактальной структуры объёма трёхмерного фазового информационного пространства через которую проходит случайный сигнал.

3. Показано, что потери информации в информационном пространстве технологического процесса в режиме реального времени зависят от изменения пространственных координат фрактального объёма, через который проходит случайный сигнал и от степенной зависимости изменения фрактальной размерности, с уменьшением которой, потери информации увеличиваются, а, следовательно, увеличивается вероятность возникновения формирования случайного сигнала с признаками аварийности.

### Список литературы

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. Буданов П.Ф. 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 объектами электроэнергетики / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2(43). – С. 84-88.
6. Буданов П.Ф. Просторово-часова модель інформаційного простору з фрактальною структурою / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 7(132). – С. 15-19.
7. Буданов П.Ф. Метод фрактального обнаружения аварийных признаков в информационном пространстве технологического процесса / П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 56-60.
8. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. / Ж. Макс. – М.: Мир, 1983. – Т1. – 312 с.
9. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
10. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: ИКИ, 2002. – 656 с.
11. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / В.К. Балханов; отв. ред. Ю.Б. Бакушев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. – 224 с.
12. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

Поступила в редколлегию 27.11.2015

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

### ВПЛИВ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ВИПАДКОВОГО СИГНАЛУ З ОЗНАКАМИ АВАРІЙНОСТІ

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко

Показано, що інформаційний простір технологічного процесу можна представити як дисипативну систему, в якій при зміні об'єму тривимірного фазового інформаційного простору технологічного процесу енергооб'єкта обов'язково слідує зміна енергії та потужності сигналу, які пов'язані зі зміною частоти випадкового сигналу, тому запропоновано знайти просторово-часову залежність зміни частоти сигналу з урахуванням фрактальних властивостей тривимірного об'єму фазового інформаційного простору, таких як фрактальний час та фрактальна розмірність часу і отримані залежності електричних характеристик випадкового фрактального сигналу, таких як потужність, енергія і частота від геометричних елементів фрактальної структури, через яку проходить випадковий сигнал.

**Ключові слова:** випадковий фрактальний сигнал, фрактальний час, фрактальна розмірність часу, обсяг інформаційного простору технологічного процесу.

### INFLUENCE OF INFORMATION SPACE FRACTAL PROPERTIES ON THE FORMATION OF A RANDOM SIGNAL WITH SIGNS ACCIDENT

P.F. Budanov, K.Yu. Brovko

It is shown that the information space of the process can be represented as a dissipative system, which in the change in volume of three-dimensional phase information space of the process power facility, be sure to change in the energy and power of the signal, which are associated with a change in frequency of a random signal, therefore, asked to find space-time the dependence of the frequency of the signal, taking into account the fractal properties of three-dimensional volume of the phase space of information, such as fractal and fractal dimension of time and time dependences of electrical characteristics of a random fractal signal, such as power, energy and frequency of the geometric elements of a fractal structure through which a random signal.

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