

УДК 519. 8

В.Е. Белозёров, В.Н. Журавлёв, В.Г. Зайцев, П.Е. Останин
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДАМИ
РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Аннотация. Проведены исследования динамики влияния энергии фазовых процессов рабочего тела камеры сгорания газотурбинного двигателя методами рекуррентного анализа. Экспериментально определены параметры бифуркационных точек и диапазоны периодичности.

Ключевые слова: фазовые процессы горения, газотурбинный двигатель, рекуррентный анализ.

Введение. Постановка задачи

В настоящее время авиационная техника в значительной степени эксплуатируется согласно стратегиям управления ресурсом, учитывающим ее техническое состояние. Одно из перспективных направлений решения задачи повышения эффективности характеристик газотурбинных двигателей (ГТД) к условиям эксплуатации, надежности и ресурса лежит в области объектно-ориентированных интегрированных систем автоматического управления и контроля. Эффективность систем контроля базируется на принципах подетальной динамической адаптации математических моделей диагностирования к параметрам физических процессов, приводящих к изменению ресурса деталей и узлов.

Таким образом, важной и актуальной задачей современного двигателестроения является разработка новых и модификация существующих математических моделей энергетических процессов ГТД. В настоящее время сформировалась концепция динамического хаоса, которая позволяет сложное поведение динамических систем, в том числе и процессов в ГТД, описывать достаточно простыми нелинейными моделями. Зачастую такое описание является единственно возможным, поскольку далеко не всегда удается реализовать наиболее проверенный и надежный путь – записать модельные уравнения, исходя из так называемых «законов сохранения», таких как законы

© Белозёров В.Е., Журавлёв В.Н., Зайцев В.Г., Останин П.Е., 2014

Ньютона в механике и уравнения Максвелла в электродинамике. Однако на практике типичны ситуации, когда основным источником информации о поведении объекта являются данные измерений наблюдаемой величины, сделанные в последовательные моменты времени, – временные ряды.

Основная часть. Краткое описание математической модели

В настоящей работе сделана попытка проанализировать процессы в камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью временных рядов. Сложность изучения таких процессов общеизвестна; она возрастает еще и в связи с тем, что эти процессы демонстрируют хаотическое поведение. Главным инструментом для изучения временного ряда, описывающего ускорения колебаний стенок камеры сгорания, является рекуррентный анализ и его визуализация с помощью рекуррентных диаграмм. Не будем останавливаться на элементах нелинейного анализа [1, 2]. Остановимся на сути поставленной проблемы, а также приведем некоторый анализ полученных численных результатов.

Для анализа была использована информация, снятая с показаний пьезоэлектрических датчиков вибраций, первый из которых был установлен в зоне крепления жаровой трубы, второй идентифицировал радиальные вибрации ведущей шестерни редуктора. Анализируемые данные представляют собой изменения ускорения колебаний стенок камеры g (м/с^2); интервал между замерами $\approx 4,63 \cdot 10^{-6}$ с, частота дискретизации 216 кГц, время наблюдения ≈ 70 с.

Ниже представлена визуализация обоих измеренных сигналов с датчиков, начиная с 690 секунды (рис.1). Отметим, что после 700-ой секунды произошла резкая смена режима работы двигателя.

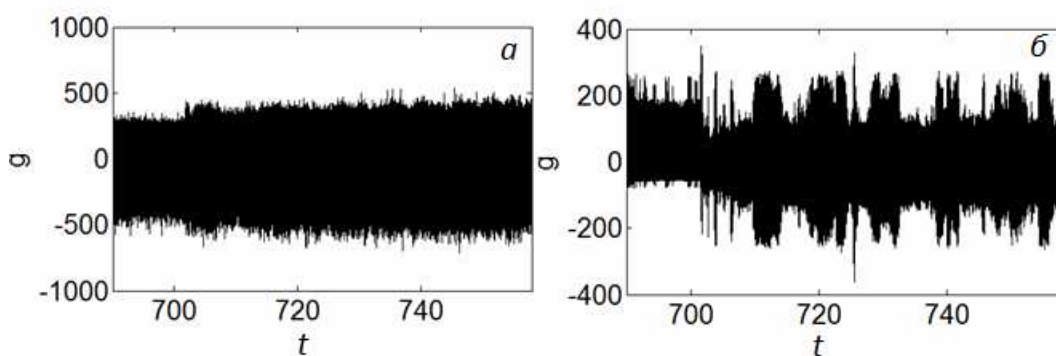


Рисунок 1 - Графики сигналов: а – первый датчик; б – второй датчик

В процессе работы ГТД происходят изменения динамических характеристик газового потока (температуры, давления или скорости). Изменение этих характеристик приводит к скачкообразной перестройке процессов в двигателе. Точки, где происходит такая перестройка и являются точками бифуркации. На рис. 2 указаны аттракторы, относящиеся к небольшим (относительно всего временного ряда) интервалам времени, на которых не происходит качественной перестройки процесса в двигателе. Нецелесообразно строить аттракторы на всем промежутке измерения, потому что такая реконструкция не несёт информации о точках бифуркации.

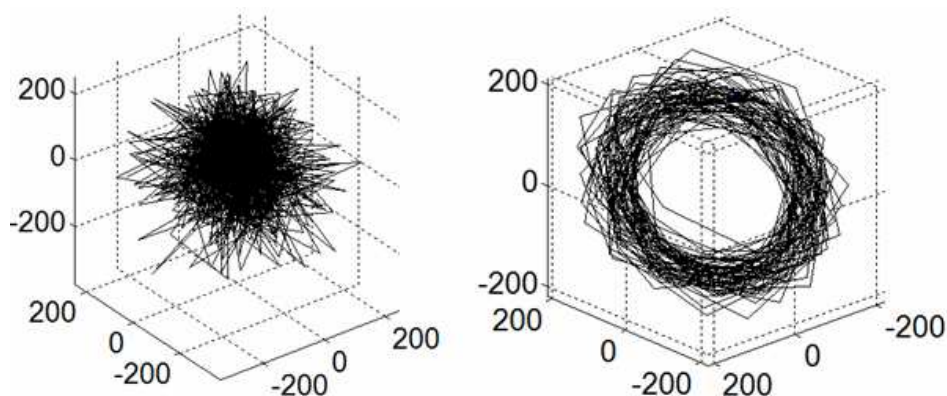


Рисунок 2 - Реконструкции поведения систем:

слева – аттрактор первого сигнала; справа – аттрактор второго сигнала

Аттрактор, приведенный на рис.2 (слева) показывает хаотичность изменения ускорения колебаний корпуса жаровой трубы, что характерно для турбулентных процессов горения. Аттрактор, приведенный на рис.2 (справа) демонстрирует квазипериодические осцилляции опоры ведущей шестерни редуктора и характеризует квазипериодические процессы роторных и зубцовых вибраций.

Визуализация аттракторов недостаточна для нахождения параметрических особенностей работы ГТД при его переходе из одного состояния в качественно другое состояние. Для определения таких критических состояний предлагается использовать нелинейный рекуррентный анализ [4], который позволит установить точки, в которых происходит качественное изменение процессов в ГТД.

Краткая методика построения рекуррентной диаграммы

Пусть точка $x(i)$ соответствует i -ой точке фазовой траектории, описывающей выбранную динамическую систему в m -мерном про-

странстве; $i=1,2,\dots,N$. Тогда рекуррентный график есть массив точек $N \times N$, где ненулевой элемент с координатами (i, j) соответствует случаю, когда $x(j)$ достаточно близко к $x(i)$.

Рекуррентность состояния в момент i при различных значениях времени j воспроизводится внутри двумерной квадратной матрицы с черными и белыми точками, где черные точки обозначают наличие рекуррентности (близости траекторий), а по обеим осям откладывается время. Такое представление называется рекуррентной диаграммой. Математически это может быть выражено следующим образом:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), x_i \in R^m, i, j = 1, 2, \dots, N$$

где N – число рассматриваемых состояний x_i , ε_i – граничное расстояние или расстояние от центра выбранной окрестности (точка $x(i)$) до ее границы, $\|\cdot\|$ – евклидова норма, и $\Theta(\cdot)$ – функция Хевисайда.

Согласно определению, основная диагональ $R_{i,j} = 1$ ($i=1,2,\dots,N$) полностью состоит из черных точек и называется линией тождественности. Стоит подчеркнуть, что отдельные рекуррентные точки (i, j) не несут никакой информации о текущих состояниях в моменты i и j , однако, в совокупности позволяют реконструировать свойства процесса.

На практике бесполезно, да и почти невозможно обнаружить абсолютно рекуррентные состояния в том смысле, что $x_i \equiv x_j$. По этой причине состояние x_i рекуррентно состоянию x_j , если они оказываются достаточно близкими друг к другу. Это означает, что векторы x_j , попадающие в m -мерную окрестность радиуса ε_i с центром в точке x_i , являются рекуррентными, а такие точки называются рекуррентными точками.

Поскольку сложные системы содержат много компонент и их поведение определяется большим числом взаимодействий, то даже одна из этих компонент и их поведение определяется большим числом взаимодействий. Именно из этих соображений в нелинейном рекуррентном анализе и вводится размерность пространства вложения (m) и запаздывание по времени (τ).

Отметим, что для построения рекуррентных диаграмм (РД) и их численного анализа используется программное обеспечение в среде MatLab.

Рассмотрим построение РД для имеющихся двух последовательностей данных.

Построим РД для данных с каждого датчика. Для этого сначала определим оптимальную размерность пространства вложения, в котором должен протекать наш процесс. Его расчет представлен на рис.3.

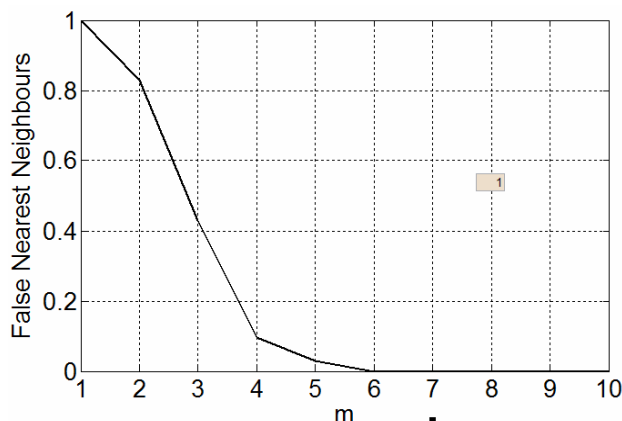


Рисунок 3 - Расчет размерности пространства вложения

Таким образом, наиболее вероятно, что полученный временной ряд описывает поведение динамической системы как минимум в шестимерном пространстве (отдельные численные эксперименты показывают, что эта размерность может достигать 10). В принципе, если речь идёт о каком-то механическом (газо- или термодинамическом) процессе, то достаточно трёх уравнений, каждое из которых является той или иной формой второго закона Ньютона.

Взяв размерность пространства вложения $m=6$, время задержки $\tau=1$ получим следующие рекуррентные диаграммы, представленные на рис.4.

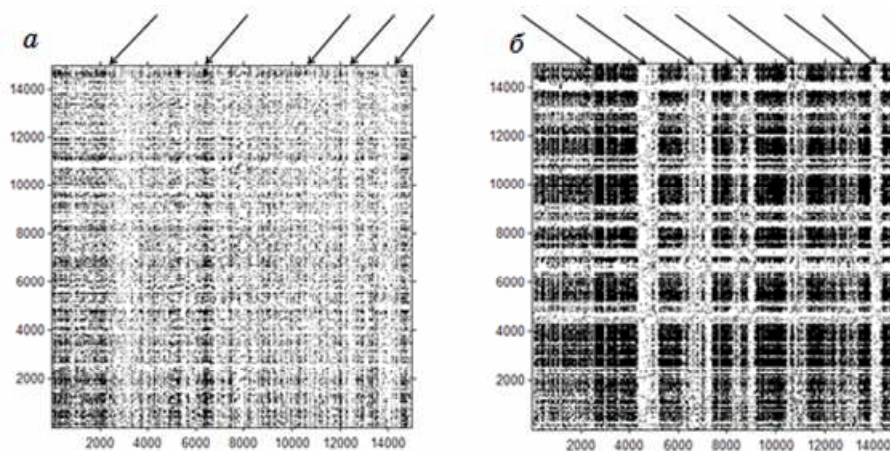


Рисунок 4 Рекуррентная диаграмма для данных: а - первого датчика, б - второго датчика

Резкие изменения контрастности и яркости на графиках показывает наличие бифуркационных переходов в соответствующие моменты времени (на графиках указаны стрелками).

Кросс-рекуррентный анализ

Графический инструмент кросс-рекуррентных диаграмм (КРД) позволяет проводить подобный анализ уже для двух временных рядов. Впервые обобщение РД на их «двумерный аналог» был сделан Збилутом в 1998 году [5] и независимо от него Марваном [3].

Очевидно, что поскольку мы рассматриваем два ряда, то невозможно говорить о рекуррентности их состояний относительно друг друга, а лишь о конъюнкции (совпадения по времени) состояний обеих сторон. Тем не менее, термин «кросс-рекуррентная диаграмма» используется, в данном случае, в силу удобства и наглядности аналогии с РД.

Обе траектории, представленные КРД, должны отображать одну и ту же динамическую систему при одинаковых параметрах состояния, поскольку анализ производится в одном и том же фазовом пространстве. Это особенно важно, если временные ряды относятся к разным сериям измерений (например, температурный временной ряд и данные по измерению давления). Применение же инструмента КРД для полностью сторонних друг другу измерений не имеют физического смысла.

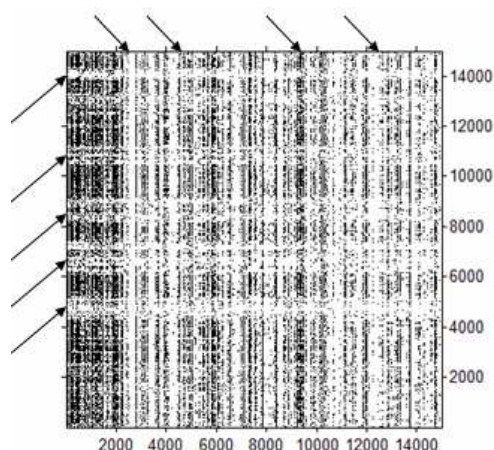


Рисунок 5 - Кросс-рекуррентная диаграмма для данных первого и второго датчика

Отметим, что КРД двух указанных временных рядов позволяет утверждать о наличии их синхронизации. Также стрелками на графике указаны диапазоны, где присутствует определённое влияние од-

ного сигнала на другой (изменение яркости и контраста), на бифуркационных интервалах, указанных на рис. 4.

Количественный анализ рекуррентных диаграмм (recurrence quantification analysis, RQA)

Ряд исследований показали, что приведенные ниже методы могут использоваться для выявления точек бифуркации и переходов из одного состояния в другое и наоборот.

Позднее были предложены методы, использующие плотность вертикальных структур РД, позволившие выявлять переходы хаос-хаос и нечувствительные к нестационарности и длине исследуемых рядов.

Приведенные ниже графики построены в предположении, что процесс меняется через каждые $4,63 \cdot 10^{-3}$ с (это сделано потому, что мы не знаем где на самом деле будут происходить бифуркационные скачки). Если же наше предположение неверно (система не меняет своего поведения через $4,63 \cdot 10^{-3}$ с), то это не будет вносить существенного изменения в анализ, а просто продублирует результаты полученные раньше.

На всех вышеприведенных графиках (рис. 6) замечен большой скачок в момент смены режима работы двигателя. Это показывает, что инструмент рекуррентного анализа действительно способен отследить такие скачкообразные изменения параметров. Ниже описаны основные нелинейные характеристики, используемые в рекуррентном анализе.

Мера рекуррентности (Recurrence rate) – показывает плотность рекуррентных точек. Данная мера описывает вероятность нахождения рекуррентной точки в фиксированном месте на РД (вероятность повторения состояния).

Ниже описываются диагональные структуры. Они показывают время, в течение которого участок траектории подходит достаточно близко к другому участку траектории. Таким образом, эти линии позволяют судить о расхождении траектории через какое-то время.

Средняя длина диагональных линий (Averaged diagonal line length) – это среднее время, в течение которого два участка траектории проходят близко один к другому. Эта величина, может рассматриваться как среднее время предсказуемости процесса.

Мера детерминизма (Determinism) или мера предсказуемости поведения процесса – это отношение рекуррентных точек, составляющих диагональные структуры, к общему количеству рекуррентных точек. Процессы со стохастическим поведением могут порождать очень короткие диагонали либо вообще не порождать их, в то время как детерминированные процессы дают длинные диагонали и малое количество отдельных рекуррентных точек.

Мера энтропии (Entropy) – отражает величину детерминированной составляющей в системе.

Мера замирания (Laminarity) – определяется отношением количества рекуррентных точек, образующих вертикальные линии, к общему количеству рекуррентных точек. Ламинарность характеризует наличие состояния замирания системы (т.е. когда движение системы по фазовой траектории останавливается или продвигается очень медленно).

Средняя длина вертикальных структур (Trapping time) – мера времени остановки процесса. Эта величина характеризует среднее время, которое система может провести в определённом состоянии.

На рис. 6 представлены графики вышеописанных мер RQA (слева для данных первого датчика, справа для второго).

Из графиков видно, что вероятность повторения состояний первого сигнала очень мала и процесс является малопредсказуемым. Для второго же сигнала начиная с $N \approx 2500000$ и более повторение состояний практически невозможно (вероятность такого повторения близка к 0.05) и процесс становится плохо предсказуемым.

Кроме этого, приведенные графики показывают, что средние длины диагональных линий сигнала снятого с первого датчика изменяются незначительно; время, когда траектории проходят близко друг от друга, – постоянно. В тоже время можно утверждать, что для второго сигнала при $N < 2500000$ время, когда траектории проходят близко друг от друга, – постоянно (что говорит о возможности предсказуемости процесса).

Из анализа мер RQA видно, что фазовые траектории процесса меняются достаточно быстро.

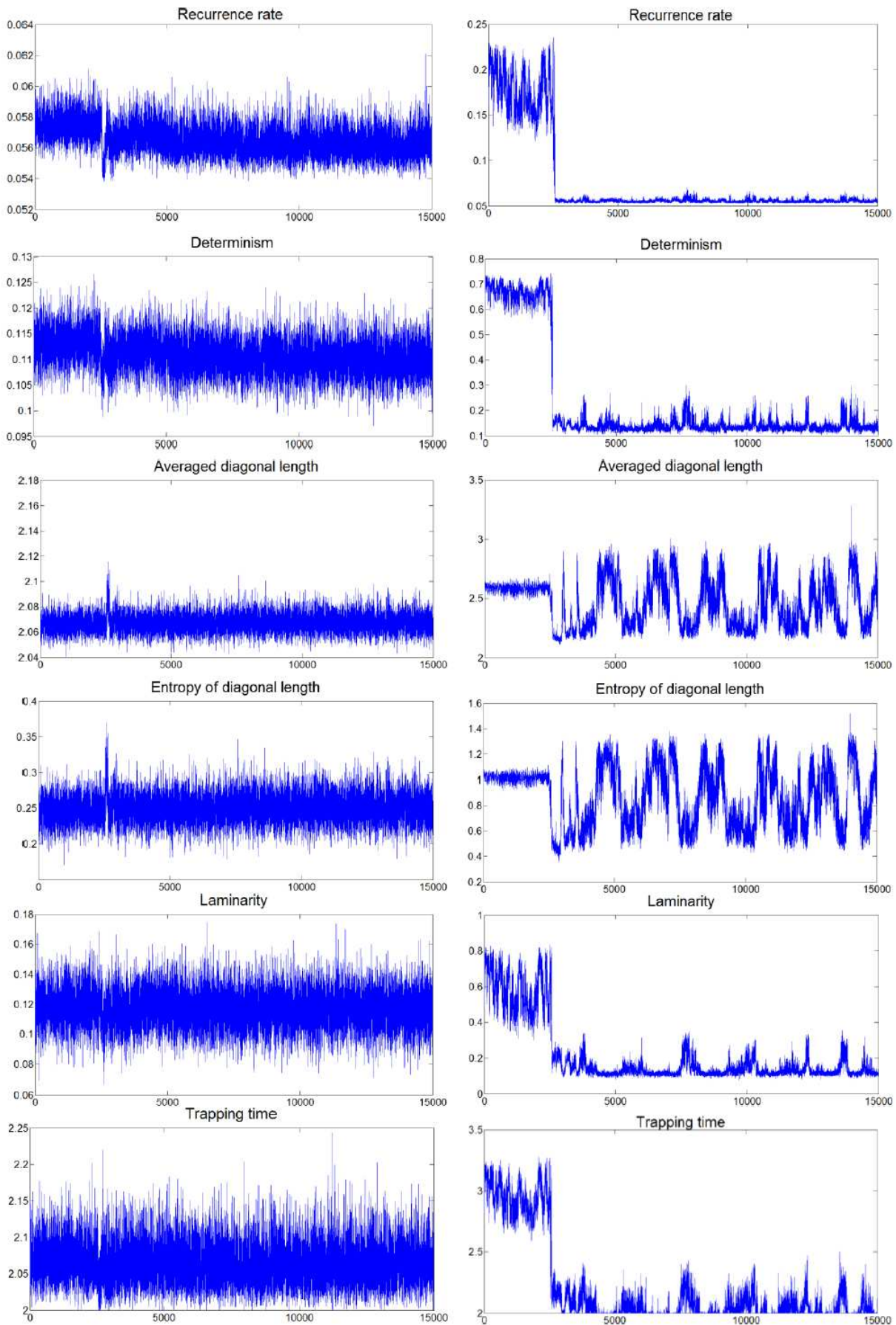


Рисунок 6 - Меры RQA

Выводы:

1. Указаны бифуркационные точки, после перехода через которые динамика процесса меняется.

2. Доказано существования диапазонов ускорения, в которых динамический процесс внутри камеры сгорания принимает периодический характер.

3. Показано, что для анализа сложных нелинейных процессов удобно использовать аппарат рекуррентных диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозёров В.Е., Зайцев В.Г. Нелинейный рекуррентный анализ в обработке временных рядов. Региональный межвузовский сборник «Системные технологии», Вып. 3 (92) 2014, стр. 42-49.
2. Norbert Marwan, M. Carmen Romano, Marco Thiel. Jurgen Kurths. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports* 438, 2007. – p. 237-239.
3. N. Marwan, M. Thiel, N. R. Nowaczyk: Cross Recurrence Plot Based Synchronization of Time Series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9(3/4), 325–331p. (2002).
4. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Recurrence Plots of Dynamical Systems.// *Europhysics Letters* 5. – 1987. – P. 973-977.
5. J.P. Zbilut, A. Giuliani, C.L. Webber, Jr.: Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification, *Physics Letters A*, 246(1–2), 122–128p. (1998).