

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039: 621.311.25  
DOI 10.26583/gns-2023-03-07  
EDN WOBBVC



Совершенствование методов анализа технического состояния  
электромеханического оборудования АЭС

Е.А. Абидова

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия  
*e-abidova@mail.ru*

**Аннотация.** В статье анализируется проблема диагностики электроприводной арматуры АЭС. Выход из строя данного вида оборудования может стать исходным событием для проектной или запроектной аварии. Поэтому в период планово-предупредительных ремонтов на АЭС проводится диагностирование до 2000 единиц арматуры в основном путем регистрации и анализа сигнала тока двигателя в процессе открытия и закрытия. Однако применяемые статистические и частотные методы анализа не всегда обеспечивают необходимое качество диагностирования. В статье указывается на недостаток применяемых методов – нечувствительность к динамике электромеханического оборудования с точки зрения нелинейных проявлений дефектов. В качестве инструмента анализа указанных проявлений предложен фазово-плоскостной метод и изложены его теоретические основы. Диагностический сигнал описывается как векторная диаграмма гармонического ряда, подвергаемого амплитудной и фазовой модуляции. Показаны наиболее характерные формы фазовых траекторий – кардиоиды, нефроиды, эпициклоиды. Основные преимущества фазово-плоскостного метода перед традиционными частотными методами, – чувствительность, возможность идентификации вида модуляции, сдвига фаз, динамических и хаотических проявлений, – продемонстрированы примерами обработки диагностических сигналов оборудования АЭС. Немаловажным преимуществом, которое дает представление сигнала в виде фазового портрета является наглядность отображения динамических особенностей сигнала. Результатом работы является новый метод, позволяющий извлекать дополнительную информацию о состоянии объекта за счет анализа нестационарной составляющей исходных данных. Предложено внедрение фазово-плоскостного метода в практику обработки диагностических сигналов электроприводной арматуры и другого электромеханического оборудования, эксплуатируемого на АЭС.

**Ключевые слова:** диагностический сигнал, фазовая траектория, гармонические ряды, глубина модуляции, хаос, эпициклоида.

**Для цитирования:** Абидова Е.А. Совершенствование методов анализа технического состояния электромеханического оборудования АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):72–81. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-07>

Improvement of methods for analyzing the technical condition of electromechanical  
equipment of nuclear power plants

Elena A. Abidova <sup>1</sup>

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russia  
*e-abidova@mail.ru*

**Abstract.** The article analyzes the problem of diagnostics of NPP electric drive valves. Failure of this type of equipment can become the initial event for design or beyond design accident. Therefore, during the period of preventive maintenance at NPPs diagnostics of up to 2000 units of valves is carried out mainly by registration and analysis of the motor current signal during opening and closing. However, the applied statistical and frequency analysis methods do not always provide the necessary quality of diagnostics. The article points out the disadvantage of the applied methods – insensitivity to the dynamics of electromechanical equipment in terms of

nonlinear manifestations of defects. As a tool for analyzing these manifestations the phase-plane method is proposed and its theoretical basis is outlined. The diagnostic signal is described as a vector diagram of a harmonic series subjected to amplitude and phase modulation. The most characteristic forms of phase trajectories - cardioids, nephroids, epicycloids – are shown. The main advantages of the phase-plane method over traditional frequency methods – sensitivity, possibility to identify the type of modulation, phase shift, dynamic and chaotic manifestations – are demonstrated by examples of processing diagnostic signals of NPP equipment. An important advantage of signal representation in the form of phase portrait is the visualization of dynamic features of the signal. The result of the work is a new method that allows to extract additional information about the object state by analyzing the non-stationary component of the initial data. It is proposed to introduce the phase-plane method into the practice of processing diagnostic signals of electric drive valves and other electromechanical equipment operated at NPPs.

**Keywords:** diagnostic signal, phase trajectory, harmonic series, modulation depth, chaos, epicycloid.

**For citation:** Abidova E.A. Improvement of methods for analyzing the technical condition of electromechanical equipment of nuclear power plants. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):72–81 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-07>

## 1. Актуальность проблемы

Техническая диагностика в атомной энергетике является одной из основных технологий, обеспечивающих поддержку безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС [1]. Обслуживание электроприводного оборудования занимает до 70% по объёму выполняемых работ в период планово-предупредительных ремонтов (ППР) [2]. К электроприводному оборудованию относятся электроприводная арматура (ЭПА), насосы, приводы системы управления и защиты, перегрузочная машина, дизель-генераторы.

На блоке АЭС эксплуатируется более 2000 единиц арматуры, из нее свыше 30 % приходится на высокоответственную запорную и запорно-регулирующую. С арматурой АЭС связано до 25 % простоев энергоблока, до 40 % отказов оборудования, до 50 % затрат на ремонт и до 85 % всего заменяемого оборудования<sup>1</sup>. Отказ ЭПА может стать исходным событием для проектной или запроектной аварии.

Проблемой диагностирования оборудования АЭС является то, что полноценную диагностику можно проводить в период ППР (один раз в 12 или 18 месяцев), и по результатам диагностирования устанавливается возможность безотказной эксплуатации данного оборудования в межремонтный период. Повышение чувствительности применяемых методов диагностирования к зарождающимся дефектам является задачей, актуальность которой повышается в связи с увеличением мощности реакторной установки (на 104% для ВВЭР-1000), сокращением сроков ремонта.

## 2. Существующие методы анализа диагностических сигналов

Обработка диагностических сигналов в штатных системах диагностики заключается в использовании статистических методов, а также методов анализирующих детерминированную составляющую сигнала, – преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, – широко представленными в работах Баркова Н.А. [3], Русова В.А., Адаменкова А.К. и др. Однако в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [4-6] показано, что электромеханическое оборудование при наличии отклонений в его техническом состоянии демонстрирует хаотическое поведение, что отражается в характере диагностических сигналов. Такие нерегулярные составляющие сигнала не могут быть эффективно идентифицированы традиционными методами.

<sup>1</sup> СТО 1.1.1.01.002.0069-2017 Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739253.pdf> (дата обращения: 04.04.2022).

Расширение спектра выделения диагностической информации из экспериментальных данных базируется на фундаментальных идеях Л. Больцмана, К. Шеннона и А. Колмогорова, представивших информацию универсальной первичной категорией, объединяющей понятие энтропия. В этом случае энтропия может использоваться в качестве количественной меры оценки неопределенности и хаотичности процессов в динамических объектах и, обладая инвариантностью к таким особенностям сигналов, как нестационарность и негладкость, может служить инструментом при осмысливании и интерпретации результатов диагностических процедур [5,7]. Недостатком подхода является то, что для различных проявлений деградации в сигнале (усложнение, самоорганизация, хаос) целесообразно применять различные способы расчета энтропийных индексов, что требует предварительной экспертной оценки исходной информации.

Повышение чувствительности анализа диагностической информации в работах Reza Golafshan, Al Bugharbee Hussein, Trendafilova Irina [6,8] предлагается осуществить на основе использования метода главных компонент. Метод главных компонент позволяет за счет выделения наиболее существенной информации уменьшать размерность данных, осуществлять сжатие объемов информации с минимальным искажением структуры исходных данных. Однако широкое практическое внедрение метода [9,10], усложняется неоднозначностью представления и интерпретации результатов.

Теоретическим анализом процессов взаимодействия элементов электромеханического оборудования идентифицированы фазово-динамические характеристики диагностических сигналов [8]. Настоящее исследование направлено на параметризацию нелинейных и хаотических генераций в диагностических сигналах ЭПА путем использования фазово-плоскостного метода (ФПМ).

### 3. Методика

#### 3.1 Суть фазово-плоскостного метода

Применительно к анализу сигналов суть ФПМ: представление гармоник диагностического сигнала как совокупности фазоров на комплексной плоскости. Фазор – вращающийся вектор, исходящий из центра координат комплексной плоскости, длина которого соответствует амплитуде гармоники, начальное положение фазе, скорость вращения частоте (рис. 1).

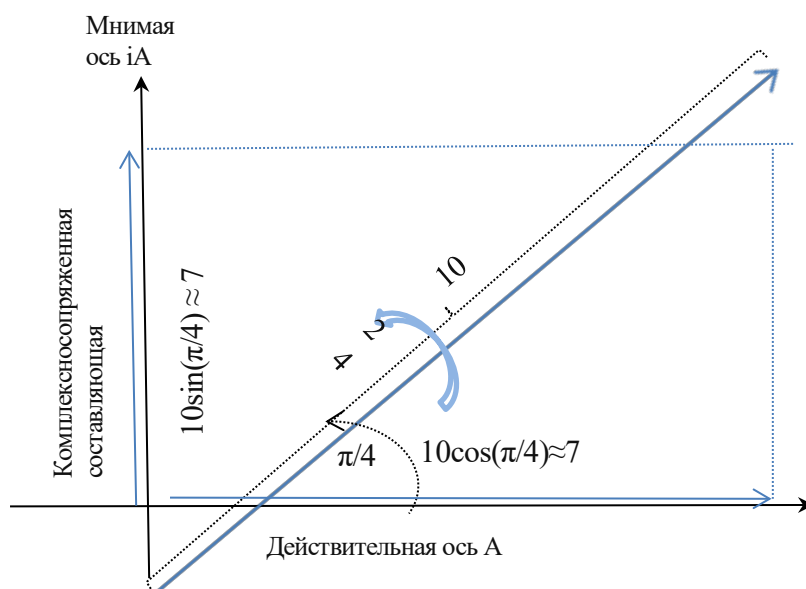


Рисунок 1. Пример векторной диаграммы колебания  $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$   
Figure 1. Example vector diagram of oscillation  $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$

Проекция фазора на действительную ось соответствует текущей амплитуде. Проекция фазора на мнимую ось соответствует текущей амплитуде комплексно-сопряженной составляющей. Комплексно-сопряженная составляющая может быть получена путем преобразования Гилберта:

$$\tilde{i}(t) = H[i(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i(u)}{\pi(t-u)} du$$

Физический смысл преобразования Гилберта – смещение всех гармоник сигнала на  $\pi/2$ . То есть положение фазора определяется более «ранним» и более «поздним» значением сигнала. Совокупность (мгновенная сумма) действительной и мнимой составляющих называется аналитическим сигналом. Проекцию аналитического сигнала на комплексную плоскость, как показано на рисунке 2, можно рассматривать как фазовый портрет (ФП).

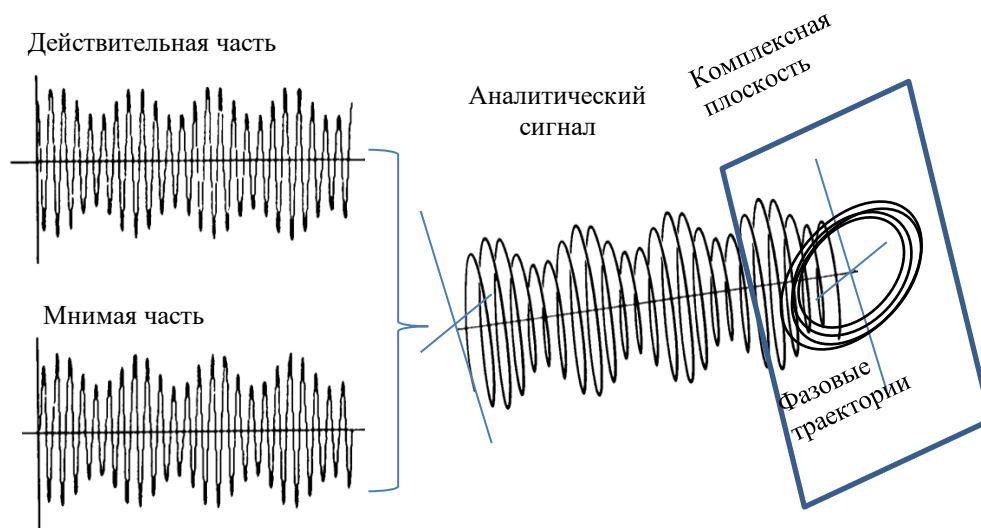


Рисунок 2. Проекция аналитического сигнала на комплексную плоскость  
Figure 2. Projection of analytical signal on the complex plane

Реальный сигнал содержит большое число гармоник-фазоров, которые складываются в результирующий вектор, мгновенное положение которого определяются геометрической суммой всех элементарных фазоров. Конец результирующего вектора описывает фазовую траекторию, которая является замкнутой, если сигнал периодический. Реальный диагностический сигнал не обладает строгой периодичностью (в большинстве случаев они являются квазипериодическими т.е. период изменения является случайной функцией), однако за определенный период наблюдений можно выделить устойчивую совокупность траекторий, которые почти не меняют положения на комплексной плоскости. Таким образом, фазовый портрет (ФП) сигнала – это полная совокупность фазовых траекторий.

### 3.2 Формирование ФП диагностического сигнала

**3.2.1 Проявление гармонических рядов.** Итак, гармоника диагностического сигнала представляется фазором на комплексной плоскости. Фаза задает начальное положение данного вращающегося вектора. Например, в момент времени  $t=0$  проекция фазора на действительную ось – произведение амплитуды на косинус фазы, а проекция фазора на мнимую ось – произведение амплитуды на синус фазы. Единственный фазор своим концом описывает, естественно, окружность.

Как известно [3], особенностью диагностических сигналов является формирование гармонических рядов. Это значит, что помимо вектора основной

гармоники будут присутствовать фазоры, которые вращаются в 2, 3, 4 и более раз быстрее, чем фазор основной. Векторы складываются в результирующий вектор, мгновенное положение которого определяются геометрической суммой всех элементарных фазоров.

Например, построим векторную диаграмму сигнала, определяемого аналитическим выражением (рис. 3). Для этого из точки пересечения координат отложим векторы, длины которых соответствуют амплитудам, а поворот фазам гармоник, векторы сложим по правилу параллелепипеда. В данном примере результирующий вектор длиннее любого из исходных. Вращаясь, эти два вектора будут то «нагонять» друг друга, то расходиться, а их сумма то увеличиваться, то уменьшаться, результирующий вектор будет чертить фигуру, которую принято называть кардиоиды.

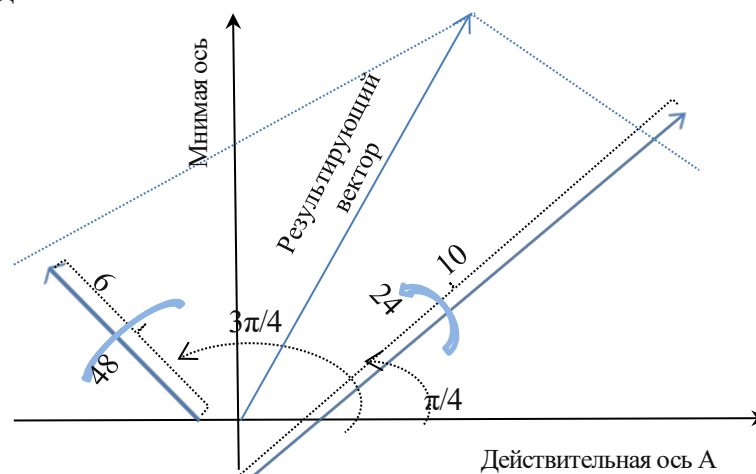


Рисунок 3. Пример векторной диаграммы гармонического колебания  $A(t) = 10\cos(2\pi 24t + (\pi/4)) + 6\cos(2\pi 48t + (3\pi/4))$

Figure 3. Example vector diagram of a harmonic oscillation  $A(t) = 10\cos(2\pi 24t + (\pi/4)) + 6\cos(2\pi 48t + (3\pi/4))$

Кардиоиды (фигура в виде сердца) в зависимости от разности фаз поворачивается вокруг центра. Если появится фазор, скорость которого в 3 раза больше основной, то результирующий вектор очертит нефроиду (фигура в виде почки). В класс нефроид попадает большое разнообразие форм фигур. Вид конкретной нефроиды зависит от соотношения амплитуд фазоров и разности фаз. Характерно, что один и тот же спектр может соответствовать разным формам фигуры данного типа.

Кардиоиды (рис. 4а) и нефроиды (рис. 4б) являются частным случаем эписциклоид. Если фигуры формируются фазорами числом более трех, то будем называть их сложными эписциклоидами. В большинстве случаев на практике увеличение размера и усложнение формы (переход от окружности к кардиоиде) принято трактовать как признак ухудшения состояния.

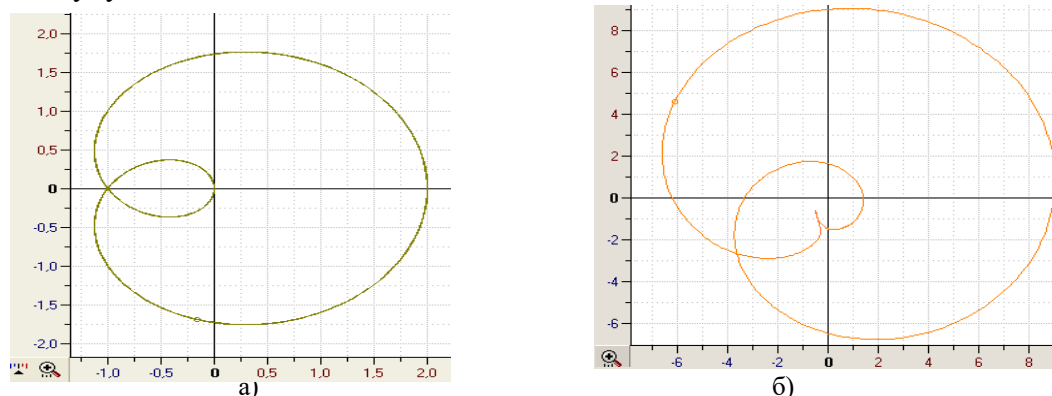


Рисунок 4. Фазовые портреты гармонических рядов: а) кардиоиды; б) нефроиды  
Figure 4. Phase portraits of harmonic series: a) cardioid; b) nephroid

Чаще всего ФП диагностического сигнала ЭПА близок к кардиоиду. При чем сдвиг фаз между кратными гармониками не влияет на размер ФП, но влияет на проекцию на действительную ось. Пользуясь известными – статистическими – методами, наблюдая за поведением только действительной составляющей, констатируем как бы уменьшение или как бы увеличение диагностических параметров, хотя на самом деле состояние объекта не меняется. Анализ размера портрета в целом позволяет избежать ошибок и выявить истинные тенденции изменения состояния. Различным состояниям могут соответствовать близкие значения диагностических параметров и почти одинаковые спектры, при этом портреты будут различаться

**3.2.2 Проявление модуляции.** Другая особенность диагностических сигналов – модуляция [3]. Различают амплитудную, фазовую и частотную модуляцию. Фазовая модуляция показана на рисунке 5.

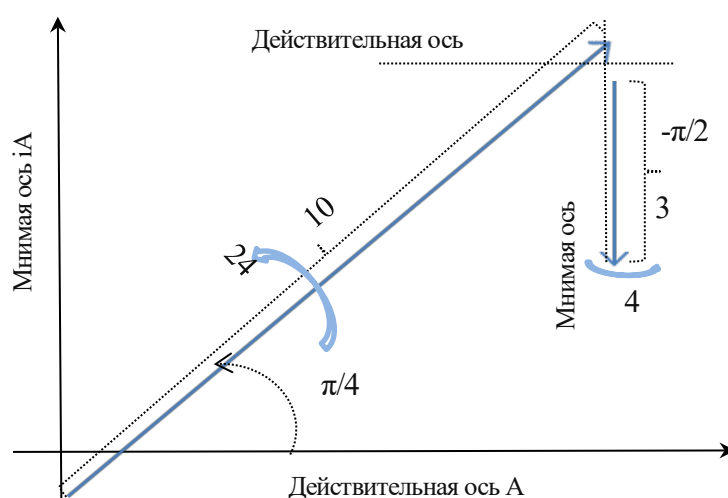


Рисунок 5. Пример диаграммы фазовой модуляции вида  $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+3\cos(2\pi 4t+(-\pi/2))$   
 Figure 5. An example of a phase modulation diagram of the form  $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+3\cos(2\pi 4t+(-\pi/2))$

Рассмотрим, как эти виды модуляции проявляются в форме фазовых портретов. Начнем с фазовой. В этом случае вектор, соответствующий модулирующей гармонике, вращается в плоскости, центр координат которой находится на конце несущего вектора. Получается, что несущий вектор «несет» модулирующую гармонику. Модулирующий вектор, вращаясь со своей частотой, складывается с несущим вектором, из-за чего результирующий вектор то увеличивается и «разгоняется» вперед, то уменьшается и «отбегает» назад. В результате фазовая траектория приобретает петляющий вид.

Проявление амплитудной модуляции (рис. 6), описать несколько сложнее, чем фазовой. При амплитудной модуляции два вектора, соответствующие модулирующей гармонике, вращаются в комплексной плоскости, центр координат которой находится на конце несущего вектора. При чем, действительная ось совпадает с направлением несущего вектора. Длины обоих модулирующих векторов соответствуют амплитуде. Оба вектора вращаются в противоположных направлениях со скоростью, соответствующей частоте модуляции. Оба вектора в начальный момент времени сдвинуты фазе в противоположные стороны. Сумма модулирующих векторов в любой момент времени параллельна несущему вектору, и по направлению то совпадает с ним, то направлена противоположно.



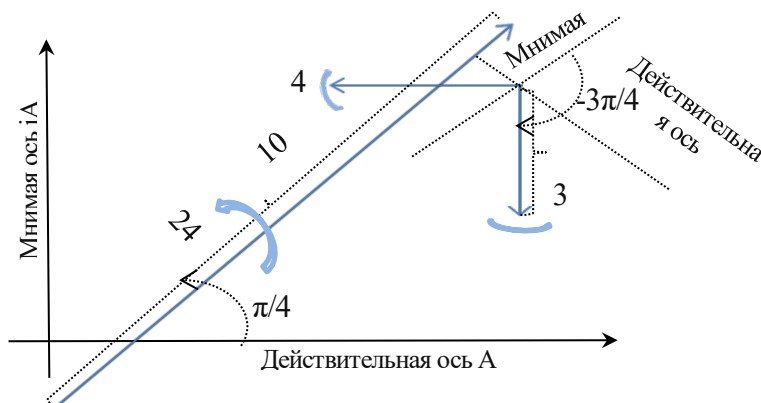


Рисунок 6. Диаграмма амплитудной модуляции  $A(t)=10(1+3\cos(2\pi 4t+(-3\pi/4)))\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$

Figure 6. Amplitude modulation diagram  $A(t)=10(1+3\cos(2\pi 4t+(-3\pi/4)))\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$

Таким образом, гармоника, которая получилась в результате суммирования несущей с модулирующей, вращается равномерно, то увеличиваясь, то укорачиваясь. Конец результирующего вектора очерчивает гладкие спиралеобразные линии.

**3.2.3 Проявление дефектов.** Форма портрета диагностического сигнала зависит от числа несущих гармоник и глубины модуляции. Глубина модуляции зависит от амплитуды и числа модулирующих гармоник. Развитие дефекта как раз может проявляться увеличением глубины модуляции. В практике анализа диагностических сигналов встречаются окружности, кардиоиды, нефроиды, эпициклоиды, сформированные петляющими траекториями. Следует обратить внимание, что в большинстве реальных сигналов несущими являются гармоники двигателя, а модулирующими гармоники дефектных деталей. Фазовая модуляция характерна для дефектов типа затирание (рис. 7а,в). Амплитудная модуляция характерна для дефектов типа скол (рис. 7б,г).

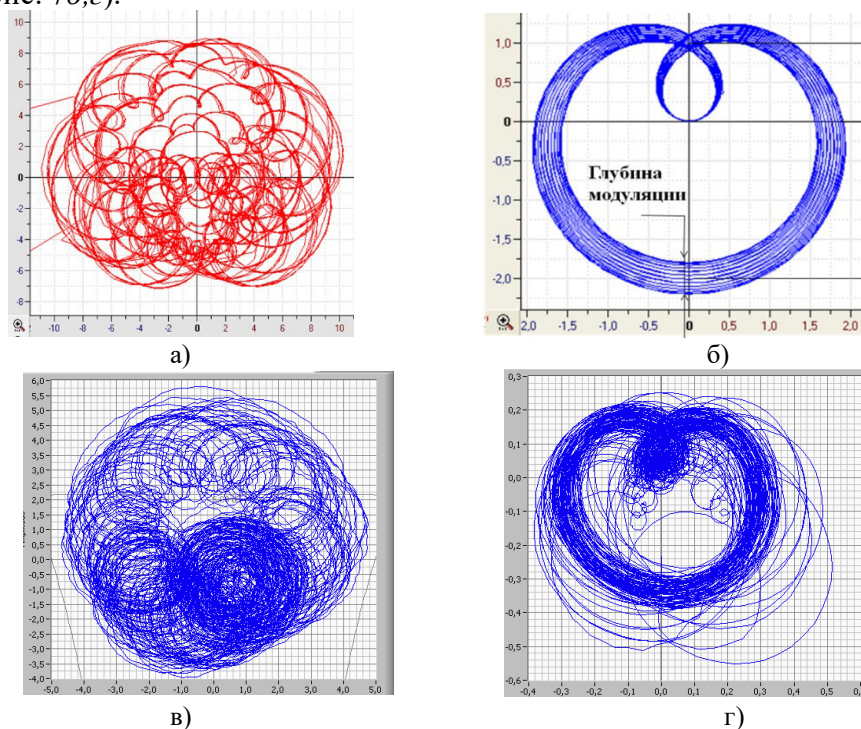


Рисунок 7. ФП при модуляции: а) фазовая модуляция (сгенерированный сигнал); б) амплитудная модуляция (сгенерированный сигнал); в) фазовая модуляция (диагностический сигнал); г) амплитудная модуляция (диагностический сигнал)

Figure 7. Phase portraits at modulation: a) phase modulation (generated signal); б) amplitude modulation (generated signal); в) phase modulation (diagnostic signal); г) amplitude modulation (diagnostic signal)

Если диагностическим является сигнал тока [2,7], то ФП исходного сигнала электромеханического оборудования почти всегда представляют собой амплитудно-модулированную окружность, анализ которой малоинформативен (несущие гармоники тока по амплитуде на порядок выше других). Поэтому целесообразно подвергнуть сигнал тока демодуляции и рассматривать ФП огибающей.

#### 4. Примеры диагностики ЭПА с использованием ФПМ

Итак, при анализе ФП следует обращать внимание на следующие особенности:

- 1) на фигуру, сформированную несущими составляющими: окружность, кардиоида, нефроида, сложная эпициклоида;
- 2) на глубину и характер модуляции.

Если в объекте протекает неустановившейся процесс, то фигура может и не сформироваться. Фигура также может быть хаотической. При оценке тенденции обращают внимание на изменение размера, изменение сложности фигуры и увеличение глубины модуляции.

Рассмотрим пример. На рисунке 8 представлен ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 13ВЦ-36 при выполнении операции открытие. По изменению фигуры можно видеть: размер ФП увеличился, форма стала более сложной, сохранился петляющий характер линии. Численно форма портрета может быть оценена шенноновской энтропией  $H_{sh}$ , которая принята как мера сложности и хаотичности. В данном случае рост  $H_{sh}$  указывает на ухудшение состояния ЭПА 13ВЦ-36.

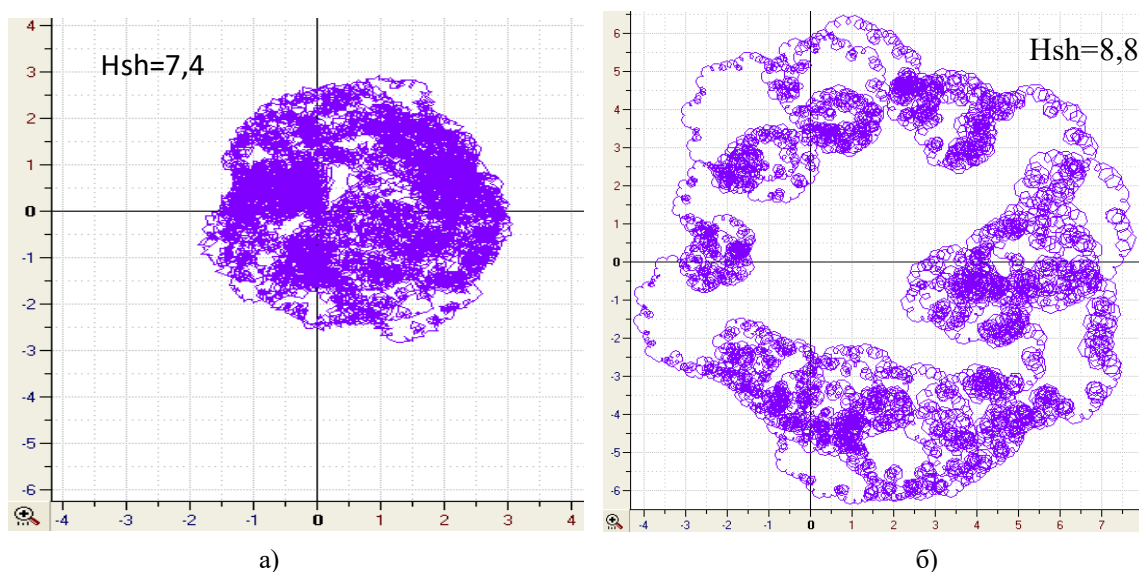


Рисунок 8. ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 13ВЦ-36: а) 17.06.2016; б) 05.07.2016  
Figure 8. Phase portraits of the current signal of the electric actuator valve with technological position 13VC-36: а) 17.06.2016; б) 05.07.2016

Другой пример. На рисунке 9 представлен ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 1ВТ-56 при выполнении открытия и закрытия. Можно заключить: размер стал меньше при открытии и закрытии, форма эпициклоидическая при открытии и закрытии (изменилась разность фаз), гладкие линии указывают на амплитудную модуляцию, глубина которой снизилась. В целом наблюдается улучшение.



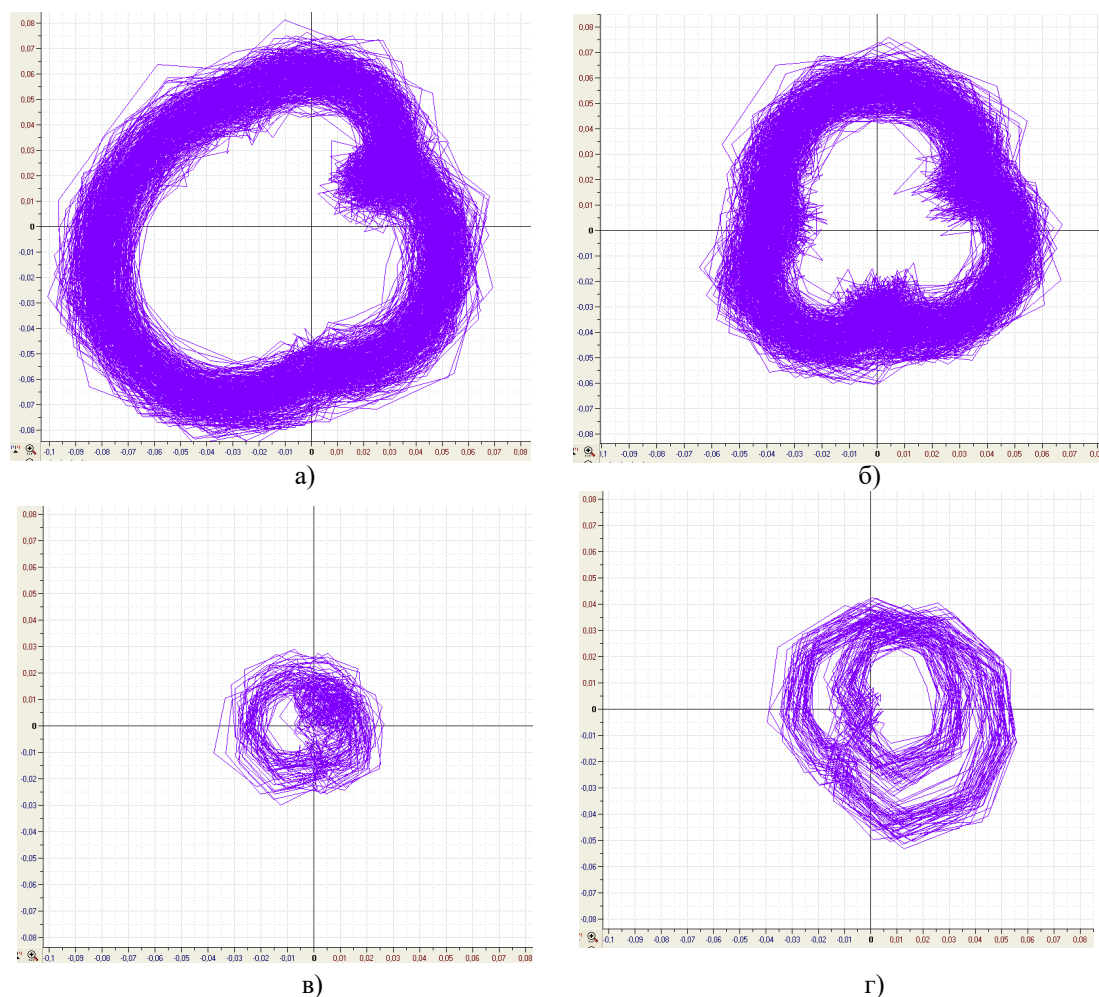


Рисунок 9 – ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 1BT-56: а) открытие; б) закрытие;  
в) открытие; г) закрытие  
Figure 9. Phase Portraits of the current signal of the electric actuator valve with technological position 1BT-56:  
a) opening; b) closing; c) opening; d) closing

Таким образом, основным преимуществом, которое дает представление сигнала в виде ФП является наглядное отображение динамических особенностей сигнала. Важными преимуществами перед традиционными, – статистическими и частотными [3] методами, – является возможность представление фазовой информации и возможность отличить фазовую и амплитудную модуляцию (тем самым уточнить вид дефекта). Следует отметить высокую чувствительность метода.

## 5. Результаты и выводы

Для повышения эффективности существующих методов обработки диагностических сигналов предлагается использование новых алгоритмов позволяющих извлекать дополнительную информацию о состоянии объекта за счет анализа нестационарной составляющей исходных данных.

Анализ динамики электромеханического оборудования с точки зрения нелинейных проявлений дефектов в диагностических сигналах обосновывает необходимость использования ФПМ. Диагностический сигнал описывается как фазор на комплексной плоскости, подвергаемый амплитудной и фазовой модуляции. Изложены теоретические основы фазово-плоскостного представления диагностических сигналов. Приводятся примеры применения метода к диагностическим сигналам ЭПА и показаны наиболее характерные формы фазовых траекторий из класса эписцилоид. Примерами из практики диагностирования продемонстрированы такие преимущества

фазово-плоскостного метода, как чувствительность, наглядность возможность идентификации вида модуляции, сдвига фаз, динамических и хаотических проявлений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Федоров А.И., Витковский С.Л. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2019;2:91–104. doi 10.26583/npe.2019.2.08
2. Саубанов О.М., Валеев А.Р., Акимов В.И., Харисов Р.М., Ташбулатов Р.Р. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насоснокомпрессорного оборудования. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2019;2:330–35. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2019-10206>
3. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Санкт-Петербург: Севзапучцентр, 2013. 158 с.
4. Гаглоева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов. *Инженерный вестник Дона*. 2013;3:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842 (дата обращения: 28.04.2023).
5. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов. *Вестник Астраханского государственного университета. Серия: Морская техника и технология*. 2015;3:96–102. URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/31410/view#article-info> (дата обращения: 28.04.2023).
6. Al-Bugharbee H., Trendailova I. A fault diagnosis methodology for rolling element bearings based on advanced signal pretreatment and autoregressive modelling. *Journal of sound and vibration*. 2016;369:246–265. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.12.052>
7. Chernov A.V., Abidova E.A., Khagai L.S. Diagnostics of rotary equipment by means of entropic indices based on electrical signals. *Russian Engineering Research*. 2018;(38)9:699–701. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18090113>
8. Hassani H., Kalantari M., Beneki C. Comparative assessment of hierarchical clustering methods for grouping in singular spectrum analysis. *AppliedMath*. 2021;1(1):18–36. <https://doi.org/10.3390/appliedmath1010003>
9. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Zarochintseva I.V., Lapkis A.A., Chernov A.V. NPP refueling process monitoring based on the refueling machine current signals. *Journal of physics: Conference series*. September 2020;1679:032016. doi: 10.1088/1742-6596/1679/3/032016
10. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Chernov A.V. Methodology and hardware-software complex for diagnosing diesel generator units of nuclear power plants. *International journal of risk assessment and management*. 2021;24(2/3/4):97–116. doi: 10.1504/IJRAM.2021.126416

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

## CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no relevant conflicts of interest

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Елена Александровна Абидова**, к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

e-mail: e-abidova@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Elena A. Abidova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

e-mail: e-abidova@mail.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023

После доработки 29.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Received 13.06.2023

Revision 29.08. 2023

Accepted 05.09.2023