

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Д. О. Тей, А. В. Гусаков

Введение

Повсеместное использование импульсных систем преобразования энергии (ИСПЭ) приводит к повышению энергоэффективности производственных процессов, уменьшению массогабитных показателей систем преобразования энергии. Однако повышение энергоэффективности приводит к использованию режимов близких к аварийным, что невозможно при значительной вариации нагрузки, дрейфе параметров ИСПЭ [4]. В результате при функционировании ИСПЭ существует реальная опасность потери устойчивости в эксплуатационном режиме и возникновения аномальных режимов с отличными от эксплуатационного частотными и пульсационными характеристиками [2, 5]. Возникновение аномальных режимов приводит к изменению характеристик преобразованной энергии, подаваемой на сопряженные системы, и может стать причиной возникновения аварийных ситуаций, в том числе катастрофических веерных отключений, которые являются недопустимыми в некоторых технологических процессах, например в добывающей отрасли или в системах ЖКХ.

Разработка системы идентификации аварийных состояний ИСПЭ, по сути, является первым шагом к разработке ИСПЭ, обеспечивающей эффективное функционирование в широком диапазоне изменения параметров системы за счет автоматической подстройки параметров регулятора.

Анализ и преобразование данных в процессе функционирования ИСПЭ

На сегодняшний день большинство методов идентификации процессов в динамических системах основаны на спектральном анализе сигнала, идентификации состояния на основании фазового портрета системы [6].

Анализ публикаций показал, что методы идентификации на основе спектрального анализа сигнала основываются на использовании двух подходов: разложение сигнала в ряд Фурье, вейвлет-анализ сигнала. В промышленности, а также в системах реального времени наибольшее распространение для исследования сигнала получили методы спектрального анализа на основе разложения сигнала в ряд Фурье. В работе [7] рассматривается один из подходов применения результата Фурье преобразования для распознавания состояния динамических систем.

В результате анализа публикаций определена область применения вейвлет-преобразования для идентификации состояния динамических систем. Вейвлет-анализ полезен для исследования нестационарных сигналов, содержащих сегменты с различным характером поведения, сигналов с особенностями (разрывами функций, производных), поскольку позволяет локализовать особенности и выявить их характер. Как отмечается в работе [8], практическое использование вейвлетов является нетривиальной задачей и требует как учета индивидуальных особенностей изучаемой задачи, так и правильного выбора используемого вейвлета. Главным недостатком применения метода вейвлет-анализа сигнала в режиме реального времени является высокая вычислительная сложность.

Анализ публикаций в области методов идентификации состояния на основании фазового портрета системы показал, что наибольший интерес для исследования представляют методики, основанные на анализе диаграммы Пуанкаре [9, 10].

Немаловажным фактором, определяющим целесообразность идентификации аварийных процессов в ИСПЭ, является задержка определения возникновения различных периодических и аperiodических процессов. В этой связи одним из способов увеличения быстродействия может стать уменьшение объема анализируемых данных. Однако непосредственное уменьшение объе-

ма анализируемых данных приведет к появлению эффекта элайзинга частот. Примеры анализируемого сигнала и возникающего эффекта элайзинга представлены на рисунках 1а и 1б.

В рамках исследования динамики импульсного преобразования энергии проводится анализ частотного спектра в диапазоне (0...14 кГц), где 14 кГц – частота синхронизации ШИМ регулятора [3]. Как видно из рисунка 1в, вне области исследования (0...14 кГц) имеется значительное количество высших гармоник с амплитудами сигнала более 10 % от основной. В этой связи, согласно [4], изменение частоты дискретизации без возникновения эффекта элайзинга невозможно.

Чтобы избавиться от эффекта элайзинга, необходимо использовать аналоговый ФНЧ непосредственно перед оцифровкой исходного сигнала. Это позволит уменьшить амплитуды высших гармоник и как следствие наложение частот в результате анализа Фурье. Результат обработки сигнала ФНЧ восьмого порядка представлен на рисунках 1г и 1д.

Задача реализации алгоритмов идентификации состояния ИСПЭ в режиме реального времени требует оптимизации вычислительных затрат расчета быстрого преобразования Фурье. Уменьшение вычислительных затрат может быть достигнуто путем снижения объема выборки обрабатываемых данных. С целью уменьшения объема выборки был разработан алгоритм определения оптимальной частоты дискретизации, включающий 4 этапа.

На первом этапе выполняется определение с требуемой точностью рабочей частоты ШИМ (Fшм). Поиск производится в окрестности рабочей частоты 14 кГц. Определение рабочей частоты ШИМ выполняется по следующему алгоритму: 1. Вычисляется математическое ожидание (M) и среднеквадратическое отклонение (σ) амплитуд спектра в окрестности рабочей частоты. 2. Вычисляется пороговое значение таких амплитуд спектра, как $M+3\sigma$. 3. Из окрестности рабочей частоты исключаются амплитуды всех гармоник, значение которых меньше порогового. 4. В качестве рабочей частоты определяется гармоника с максимальной амплитудой.

Результат выполнения первого этапа представлен на рисунке 1е.

На втором этапе проводится оценка шумового загрязнения сигнала. Для оценки уровня шума проводится исследование полученной спектрограммы на интервале (1 Гц; 14 кГц). Определение уровня шума в рассматриваемом диапазоне проводится по следующему алгоритму: 1. Вычисляется математическое ожидание (M) и среднеквадратическое отклонение (σ) амплитуд спектра. 2. Вычисляется пороговое значение таких амплитуд спектра, как $M+3\sigma$. 3. Среди гармоник амплитуды, которые ниже порогового значения, в качестве уровня шума выбирается та гармоника, амплитуда которой имеет максимальное значение.

На третьем этапе в качестве оптимальной частоты дискретизации, согласно теореме Котельникова, принимается удвоенное значение частоты последней гармоники, амплитуда которой выше уровня шума. Результат определения частоты дискретизации представлен на рисунке 1ж.

Первые три этапа алгоритма применяются во всем диапазоне варьирования нагрузок (R_n) (2–50 Ом) и параметра П-звена (α) (1–80). Результат выполнения сохраняется в таблицу со следующей структурой: нагрузка, параметр П-звена, уровень шума, оптимальная частота.

На четвертом этапе на основании полученной таблицы определяются:

- максимальный уровень шума оборудования для реализации алгоритма идентификации технологического процесса – из колонки «уровень шума» выбирается максимальное значение;
- оптимальная частота дискретизации – максимальное значение в колонке «Оптимальная частота».

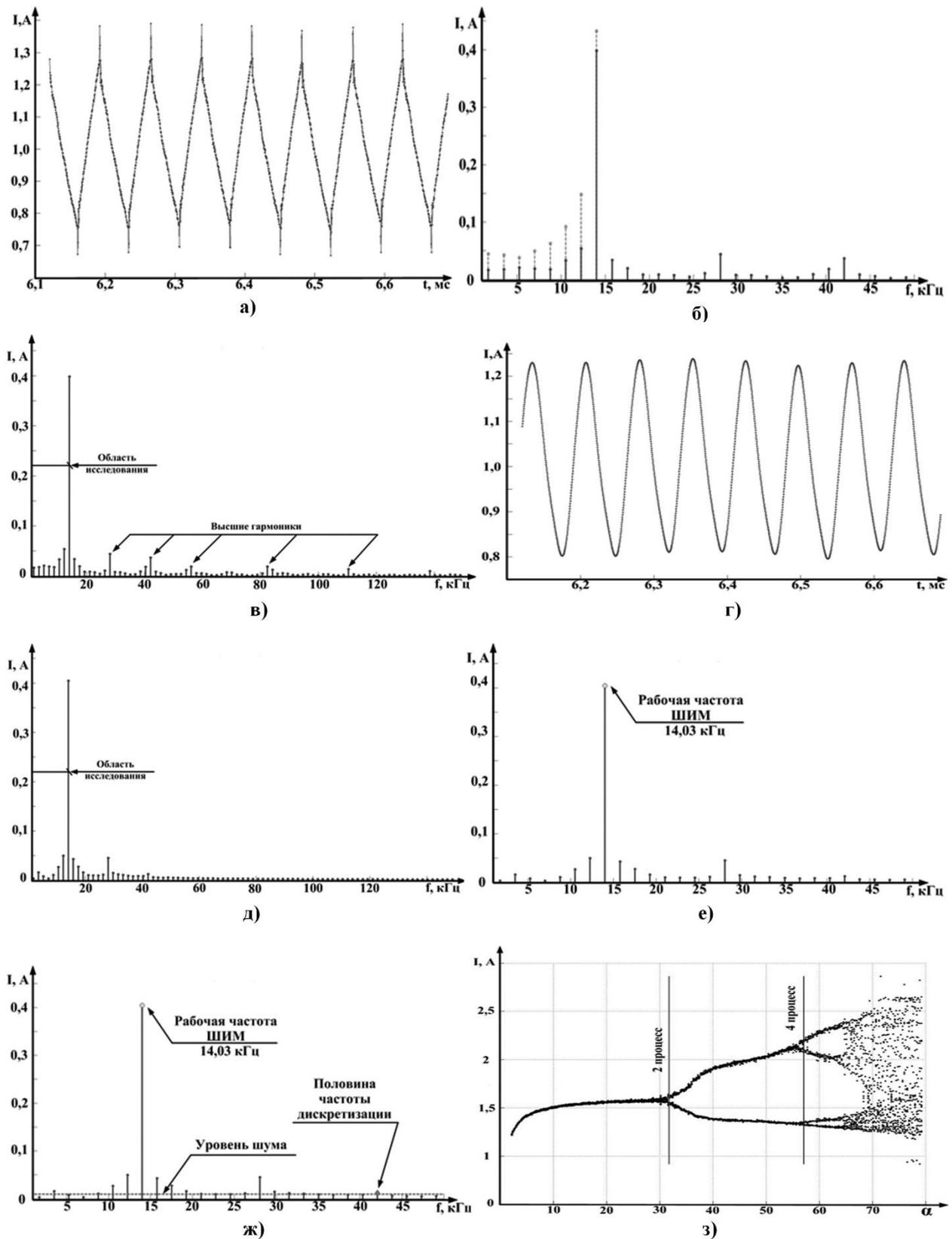


Рисунок 1 – Результат выполнения алгоритма идентификации технологического процесса для $R_n = 10$ Ом: а) временной ряд исследуемого сигнала; б) спектрограмма с эффектом элайзинга (наложившиеся частоты обозначены пунктирной линией); в) спектрограмма анализируемого сигнала; г) исходный сигнал перед обработкой ФНЧ; д) результат применения ФНЧ, спектрограмма; е) результат определения рабочей частоты ШИМ; ж) пример значения частоты последней гармоники, амплитуда которой выше уровня шумов; з) результат работы алгоритма идентификации технологического процесса

Алгоритм идентификации состояния ИСПЭ по результатам кластеризации отображения Пуанкаре

Алгоритм идентификации типа процесса, протекающего в ИСПЭ, условно можно разделить на 3 этапа.

На первом этапе выполняется определение с требуемой точностью $F_{\text{шим}}$. Выполняемые действия аналогичны первому этапу алгоритма определения оптимальной частоты дискретизации.

На втором этапе выполняется определение частот, исследуемых неэксплуатационных процессов, а именно $F_{\text{шим}}/2$ как F_2 для 2-процесса, $F_{\text{шим}}/4$ как F_4 для 4-процесса.

На третьем этапе из сигнала исключаются все гармоники, амплитуды которых находятся ниже уровня шума. В полученном массиве выполняется поиск гармоник частоты, которые соответствуют F_2 или F_4 . В алгоритме возможны три сценария: если не найдены F_2 и F_4 – 1-процесс, если найдена F_2 – 2-процесс, если найдена F_2 и F_4 – 4-процесс.

Проверка работоспособности алгоритмов определения оптимальной частоты дискретизации и идентификации типа процесса проводилась на данных, полученных на экспериментальной установке «Импульсный преобразователь напряжения» (24В-60Вт). Преобразователь построен по типовой схеме синхронного понижающего преобразователя напряжения DC-DC, в котором предусмотрено варьирование активной (R_n) и емкостной нагрузок в диапазонах 2...50 Ом и 10...400 мкФ соответственно [3].

Результат выполнения алгоритма идентификации технологического процесса для $R_n = 10$ Ом представлен на рисунке 1з. На рисунке сплошными линиями обозначены границы 2- и 4-процесса, которые определены в автоматическом режиме.

Сначала для каждого временного ряда выполняется построение диаграммы Пуанкаре и ее кластеризация.

Данные для диаграммы представляют собой мгновенные значения тока в начале периода ШИМ. Далее текущее значение тока откладывается по оси ординат, а предыдущее по оси абсцисс. Таким образом, формируется массив точек и выводится на экран.

Также массив мгновенных значений тока и значение бифуркационного параметра сохраняются для построения бифуркационной диаграммы.

Далее к каждой полученной диаграмме применяется алгоритм кластеризации k -средних (блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2а). После разделения множества точек диаграммы на кластеры, вычисляется Евклидово расстояние между центрами полученных кластеров. Результат этого шага представлен на рисунке 2 б, где окружностями указаны полученные кластеры, маркером в виде креста отмечены центры этих кластеров и прямой линией отмечено расстояние между кластерами.

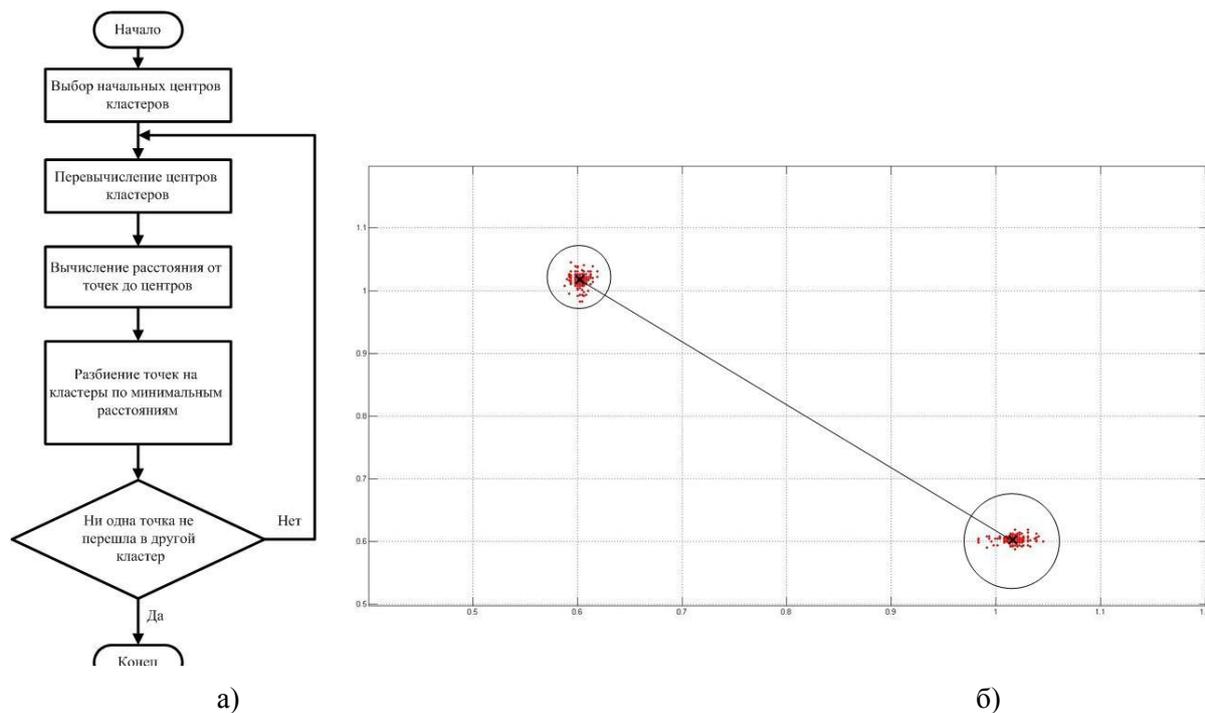


Рисунок 2 – Алгоритм определения типа процесса в импульсной системе преобразования энергии:
 а) блок-схема алгоритма б) результат работы алгоритма

После обработки всех временных рядов будет получен следующий набор данных для формирования обучающей выборки: массив значений бифуркационного параметра и Евклидова расстояния между кластерами, а также данные для построения бифуркационной диаграммы.

При создании обучающей выборки предлагается два метода: формирование производится экспертом при помощи бифуркационной диаграммы; формирование производится в автоматическом режиме.

Выводы

В работе продемонстрирована возможность использования спектрального анализа для идентификации 2- и 4-процессов в динамике импульсных систем преобразования энергии. При этом представлены алгоритмы, обеспечивающие снижение объема обрабатываемых данных без появления эффекта элайзинга частот.

Экспериментальные исследования разработанных алгоритмов показали их работоспособность. При этом задержка выявления нежелательной динамики составляет от 3 до 4 периодов ШИМ регулятора. Преимуществом разработанных алгоритмов является отсутствие необходимости сложных синхронных измерений значения сигнала в момент переключений, помехозащищенность и простота реализации за счет использования промышленно разработанных решений быстрого преобразования Фурье.

Также представлен способ определения типа периодического процесса импульсной системы преобразования энергии на базе кластеризации отображения Пуанкаре.

Литература

1. Григорян, М. Б. Методы и устройства децимации сигнала с повышенным быстродействием для цифрового спектрального анализа [Текст] : дисс... канд. техн. наук / М. Б. Григорян. – Санкт-Петербург, 2011. – 143 с.
2. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам [Текст] / И. Добеши. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 464 с.