

## ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Д. О. Тей, Е. А. Годовников, А. В. Гусаков, Н. Д. Керамов, Р. Т. Усманов

### Введение

В настоящее время системы преобразования энергии в ряде задач должны обеспечить высокое качество энергии при значительном диапазоне вариации параметров нагрузки и источников энергии. При этом, требованием при эксплуатации импульсных систем преобразования энергии (ИСПЭ) является обеспечение устойчивого функционирования системы в области параметров, соответствующих эксплуатационному режиму [1]. Существенная нелинейность импульсных систем преобразования энергии и современных нагрузок, высокая рабочая частота ШИМ, наличие коммутационных помех делают задачу идентификации состояния комплексной и ресурсоемкой [2]. Решение задачи идентификации, по сути, является первым шагом к разработке ИСПЭ обеспечивающей эффективное функционирование в широком диапазоне изменения параметров системы за счет автоматической подстройки параметров регулятора.

В статье предложен способ идентификации процессов импульсного преобразования, позволяющий идентифицировать тип динамического процесса в режиме реального времени. В первом разделе приводится описание способа идентификации, основанного на базе формирования отображения Пуанкаре и применения кластерного анализа данных. Во втором разделе описывается экспериментальная установка. В третьем разделе проводится анализ эффективности предлагаемого способа идентификации типа динамического процесса импульсного преобразования энергии.

### I. Способ автоматической идентификации типа динамического процесса импульсного преобразования энергии

В работе используется импульсный понижающий преобразователь постоянного напряжения в постоянное (рисунок 1).

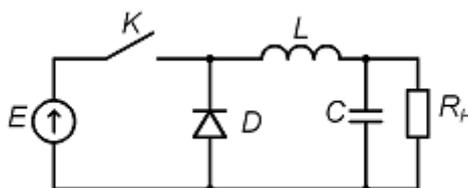


Рисунок 1 – Структурная схема импульсного понижающего преобразователя энергии

Цикл работы преобразователя можно разбить на две фазы – активная фаза, когда ключ замкнут и пассивная фаза – при разомкнутом ключе  $K$ . В активной фазе источник напряжения  $E$  подключен к нагрузке  $R_n$  через фильтр низких частот  $LC$ . В пассивной фазе ключ разомкнут, энергия из источника не потребляется, но ток продолжает течь в нагрузку за счет накопленной в фильтре энергии. Диод  $D$  нужен для перехватывания тока индуктивности, накопленного во время активной фазы. Фильтр рассчитывается таким образом, чтобы максимально подавить пульсации напряжения в нагрузке на частоте переключения ключа. В ШИМ-регулировании период переключения ключа  $T$  постоянный, а время активной фазы  $t_1$  изменяется от нуля до  $T$ . Таким образом, на нагрузке присутствует усредненное напряжение, пропорциональное входному напряжению и коэффициенту «заполнения»  $t_1/T$ , изменяющемуся от нуля до единицы.

Эксплуатационный процесс в ИСПЭ представляет собой устойчивый периодический процесс преобразования энергии с частотой ШИМ ( $f_{\text{ШИМ}}$ ) - рисунок 2а. В результате нелинейного явления в ИСПЭ происходит изменение частотных и пульсационных характеристик процесса преобразования энергии и возникает один из аномальных процессов – субгармонический, квазипериодический или хаотический. Пример аномального процесса после первой бифуркации представлен на рисунке 2б.

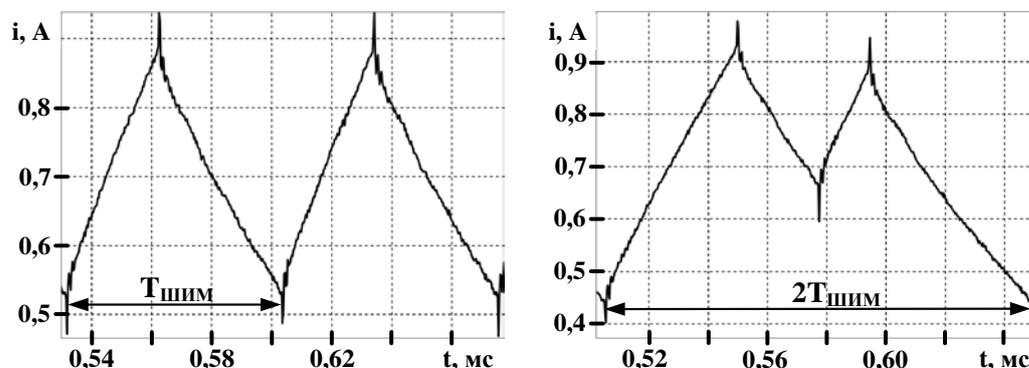


Рисунок 2 – эксплуатационный процесс (1 – процесс) (а); аномальный процесс (2 – процесс) (б)

В работе рассматриваются только субгармонические типы процессов, поэтому  $m$  принимает только целочисленные значения ( $m=1, 2, \dots$ ). В частности, частота  $f_1=1/T$  ( $m=1$ ) соответствует синхронному процессу. Существования  $m \neq 1$  типов процессов обусловлено нелинейностью динамики. Причины потери устойчивости  $m=1$  типа процесса обусловлены функционированием современных ИСПЭ в условиях широких диапазонов изменения их внутренних параметров и параметров окружающей среды. Примерами возможных причин потери устойчивости являются изменение нагрузки, исходный разброс параметров относительно паспортных номинальных значений, температуры окружающей среды, электромагнитные взаимодействия, нарушения в электропитании и т. п. [3]

В качестве базового инструмента определения периода процессов импульсного преобразования энергии используется отображения Пуанкаре.

Способ идентификации типа динамического процесса импульсного преобразования энергии состоит из трех этапов: формирование отображения Пуанкаре; кластеризация полученных данных; анализ и формирование решения.

Для формирования диаграммы Пуанкаре, сначала производим выборку значений тока из временного ряда, полученного при определенном значении коэффициента П-звена ( $\alpha$ ). Выборка производится по наступлению определённого события, а именно по спаду коммутационной функции ( $K_f$ ). Пример временного ряда с выборкой данных представлен на рисунке 3, где квадратными маркерами отмечены значения тока, выбранные по фронту  $K_f$ .

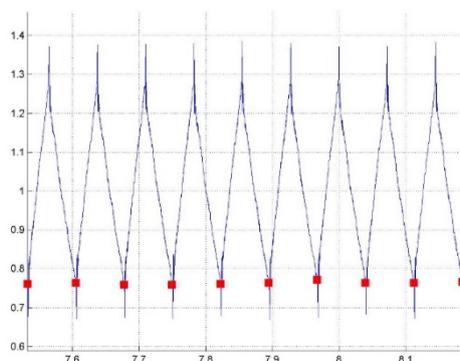


Рисунок 3 – Токовая диаграмма импульсного понижающего преобразователя энергии

Полученные данные представляются в виде отображения Пуанкаре. Диаграмма, полученная в момент бифуркации, представлена на рисунке 4.

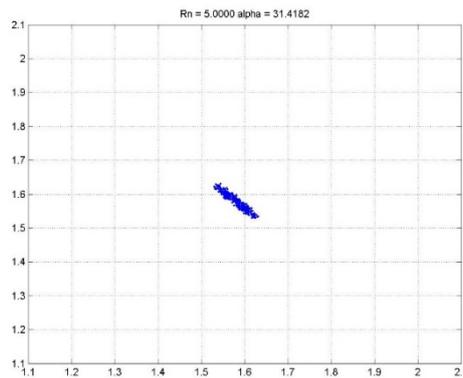


Рисунок 4 – Результат построения диаграммы Пуанкаре в момент бифуркации

Алгоритм выполнения идентификации технологического процесса ИСПЭ представляет собой три этапа.

На первом этапе производится оценка шумовой составляющей исходного сигнала. Оценка шумовой [4] составляющей производится по следующему алгоритму.

На первом шаге выполняется определение, с требуемой точностью, рабочей частоты ШИМ ( $F_{\text{шим}}$ ). Поиск производится в окрестности рабочей частоты 14 кГц. Результат выполнения первого этапа представлен на рисунке 5.

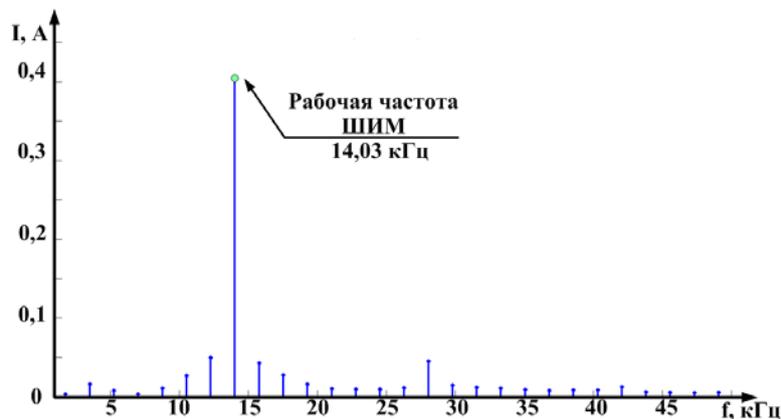


Рисунок 5 – Результат определения рабочей частоты ШИМ

На втором шаге проводится оценка шумового загрязнения сигнала. Для оценки уровня шума проводится исследование полученной спектрограммы на интервале ( $2 \times F_{\text{шим}}$  и  $3 \times F_{\text{шим}}$ ) (28 кГц; 42 кГц). Выбор этого диапазона обусловлен тем, что после обработки сигнала ФНЧ амплитуды гармоник с частотами более 42 кГц становятся несущественными.

Алгоритм применяются во всем диапазоне варьирования нагрузок ( $R_n$ ) (2...50 Ом) и параметра П-звена ( $\alpha$ ) (1...80). Результат выполнения сохраняется в таблицу.

В результате на основании полученной таблицы, определяется максимальный уровень шума оборудования, как максимальное значение в таблице.

Полученный уровень шума используется как критерий оценки типа технологического процесса.

На втором этапе из исходного сигнала производится выборка анализируемых данных. Выборка производится по наступлению определенного события, а именно по фронту коммутационной функции.

На третьем этапе производится кластеризация данных диаграммы Пуанкаре и идентификация типа процесса.

В качестве алгоритма кластеризации выбран алгоритм  $k$ -средних, так как этот алгоритм удовлетворяет требованиям вычислительной сложности, эффективности при реализации на промышленных микроконтроллерах. В качестве меры близости в алгоритме  $k$ -средних используется Евклидово расстояние.

Согласно алгоритму  $k$ -средних входной массив данных диаграммы Пуанкаре разделяется на два кластера,  $K1$  и  $K2$  соответственно. После чего производится вычисление центров полученных кластеров ( $O_{K1}$  и  $O_{K2}$ ) и расстояния между ними ( $d$ ). Расстояние между центрами кластеров вычисляется согласно формуле расстояния Евклида:  $d = \sqrt{(O_{K1} - O_{K2})^2}$ . Результат работы представлен на рисунке 6.

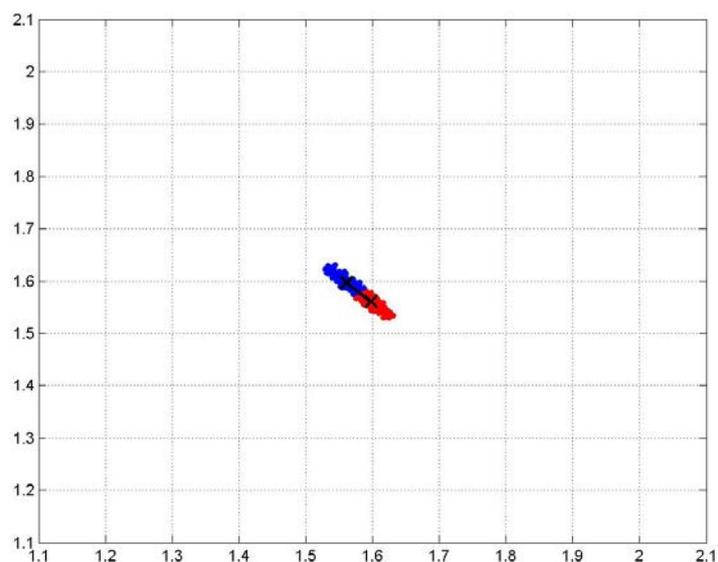


Рисунок 6 – Результат выполнения алгоритма  $k$ -средних

Для идентификации процесса используется следующий критерий – если расстояние между центрами кластера превышает уровень шума, вычисленный на первом этапе, то это состояние идентифицируется, как неэксплуатационный процесс. Результат представлен на рисунке 7.

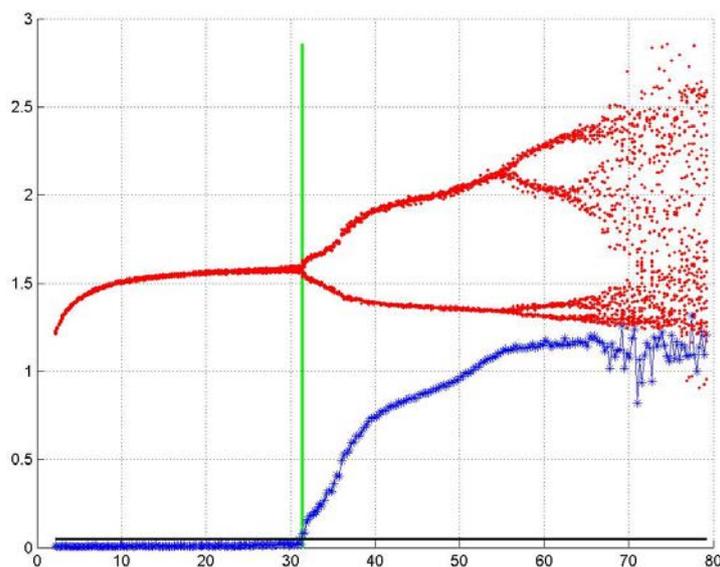


Рисунок 7 – Определение точки возникновения неэксплуатационного режима

## Литература

1. Моновская, А. В. Прогнозирование опасных ситуаций в динамике импульсных систем преобразования энергии в режиме реального времени : дис. ... к. техн. н. [Текст] / А. В. Моновская. – Орел, 2005. – 121 с.
2. Моновская, А. В. Прогнозирование аварийных состояний в автоматизированных импульсных системах преобразования энергии : дис. ... д. техн. н. [Текст] / А. В. Моновская. – Ханты-Мансийск, 2010. – 333 с.
3. Колоколов, Ю. В. Симметричные закономерности в нелинейной динамике гистерезисных регуляторов с двойной синхронизацией и адаптацией уставки [Текст] / Ю. В. Колоколов, А. В. Моновская, Д. О. Тей // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 2 (июнь). – С. 14–23.
4. Тей, Д. О. Идентификация аварийных процессов в импульсных системах преобразования энергии в режиме реального времени [Текст] / Д. О. Тей, А. В. Гусаков, Н. Д. Керамов // Научное обозрение. – 2014. – № 10, ч. 1. – С. 73–78.