

– при нормальной работе трансформатора произошел небольшой скачок температуры, а при замыканиях как первичной, так и вторичной обмоток, наблюдался ее плавный рост.

Для создания диагностических устройств и программно-аппаратных комплексов желательно использовать искусственные нейронные сети, которые являются мощным средством распознавания и прогнозирования сигналов, а их способность к обучению дает возможность разрабатывать адаптивные системы защиты и диагностики трансформаторов.

Для анализа данных, полученных с помощью приборного учета, и классификации неисправностей в программе MATLAB была реализована сверточная нейронная сеть (СНС), позволяющая контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя его из работы. СНС имеет специальную архитектуру, которая позволяет ей максимально эффективно распознавать образы. Сама идея СНС основывается на чередовании сверточных и субдискретизирующих слоев (pooling), а структура является однонаправленной. СНС получила свое название от операции свертки, которая предполагает, что каждый фрагмент изображения будет умножен на ядро свертки поэлементно, при этом полученный результат должен суммироваться и записываться в похожую позицию выходного изображения. Такая архитектура обеспечивает инвариантность распознавания относительно сдвига объекта, постепенно укрупняя «окно», на которое «смотрит» свертка, выявляя все более и более крупные структуры в изображении.

Правильность выходных данных, реализованная с помощью СНС, составила 95 %.

Практическая реализация СНС при соответствующей доработке позволит:

- диагностировать и локализовать неисправности трансформаторов;
- снизить количество unplanned отказов трансформаторов и продлить их срок службы за счет оптимизации рабочих параметров;
- повысить надежность систем электроснабжения.

Л и т е р а т у р а

1. Шерьязов, С. К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6–10/0,4 кВ / С. К. Шерьязов, А. В. Пятков // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 7.
2. Бережной, А. В. Применение нейронных сетей для моделирования относительной скорости износа изоляции трансформаторного оборудования / А. В. Бережной, Е. Г. Дашевский // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2010. – № 5. – С. 44–46.
3. Галушко, В. Н. Повышение надежности трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых коротких замыканиях / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко, С. И. Зайцев // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Наука и транспорт. – 2021. – № 2 (39). – С. 31–37.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГЕТИКИ

К. В. Керус

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

С учетом технического прогресса и новейших разработок в сфере автоматизации электроснабжения острыми становятся вопросы не только обеспечения потребителей электроэнергией должного качества, но и также вопросы устойчивости элек-

троэнергетических систем (ЭЭС) к различного вида авариям. Ранее использовавшийся расчетный метод состояния ЭЭС устарел и сейчас происходит переход к активному управлению режимами работы энергосистемы с помощью компьютерного моделирования различных аварийных и нормальных режимов работы. В данный момент для анализа режимов ЭЭС используются такие теории, как теория планирования эксперимента, теория подобия, техническая диагностика и теория устойчивости. Решение поставленных задач с помощью этих теорий неразрывно связано с двумя фундаментальными задачами: получение адекватных математических моделей описания установившихся и переходных режимов и решение задач контроля параметров ЭЭС. Кроме этого в практическом плане большую роль играют:

1. Возможность математического описания границ области устойчивости пределов управляемых параметров.
2. Возможность прогнозирования опасных и безопасных пределов управляемых параметров в зависимости от значений внутренних параметров системы.
3. Оценка степени совместного влияния различных параметров на устойчивость ЭЭС.

Именно поэтому актуально использование элементов теории катастроф для моделирования различных устойчивых режимов ЭЭС, а также для оценки состояния энергосистемы в переходных режимах. Теория катастроф является развитием и логичным продолжением теории устойчивости, а также включает в себя теорию бифуркаций дифференциальных уравнений (теория изменения качественной картины разбиения фазового пространства в зависимости от изменения параметра) и теорию особенностей гладких отображений (сопоставление каждой точке поверхности точки плоскости). В данное время существует не так уж и много программного обеспечения для использования теории катастроф в энергетике, но даже с применением уже известных методов расчета можно произвести следующие расчеты устойчивости ЭЭС:

1. Использование моделей и методов теории катастроф для определения координат контролируемых параметров и выполнение оценки устойчивости равновесных состояний в различных режимах ЭЭС с учетом конструктивных особенностей и настроечных параметров системы.
2. Оптимизация установившихся и переходных режимов ЭЭС по запасу статической устойчивости.
3. Разработка аналитических алгоритмов определения режимных и системных параметров ЭЭС по условиям статической и динамической устойчивости.
4. Проведение исследования опасных и безопасных границ параметров ЭЭС.
5. Исследование ЭЭС с учетом применения таких средств защиты, как автоматическая частотная разгрузка, автоматический ввод резерва.

В общем случае теория катастроф анализирует критические точки потенциальной функции, т. е. точки, где не только первая производная функции равна нулю, но и производные более высокого порядка. Динамика развития таких точек может быть изучена при помощи разложения потенциальной функции в рядах Тейлора посредством малых изменений входных параметров. Если точки роста складываются не просто в случайный узор, но формируют структурированную область стабильности, эти точки существуют как организующие центры для особых геометрических структур с низким уровнем катастрофичности, с высоким уровнем катастрофичности в окружающих их областях фазового пространства. Если потенциальная функция зависит от трех или меньшего числа активных переменных и пяти или менее активных параметров, то в этом случае существует всего семь обобщенных структур описанных геометрий бифуркаций и классифицированных Рене Томом (рис. 1).

k	n	Каноническая форма $f(x, a)$	Название
1	1	$x_1^3 - ax_1$	Складка
2	1	$x_1^4 + a_1 \frac{x_1^2}{2} + a_2 x_1$	Сборка
3	1	$\frac{x_1^5}{5} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Ласточкин хвост
4	1	$\frac{x_1^6}{6} + a_4 \frac{x_1^4}{4} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Бабочка
3	2	$x_1^3 + x_2^3 + a_3 x_1 x_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Гиперболическая омбилическая точка
3	2	$x_1^3 - 3x_1 x_2^2 + a_3 (x_1^2 + x_2^2) - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Эллиптическая омбилическая точка
4	2	$x_1^2 x_2 + x_2^4 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Параболическая омбилическая точка
5	1	$x_1^7 + a_1 x_1^5 + a_2 x_1^4 + a_3 x_1^3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_1$	Вигвам
5	2	$x_1^2 x_2 - x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая эллиптическая омбилическая точка
5	2	$x_1^2 x_2 + x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая гиперболическая омбилическая точка
5	2	$1 \pm (x_1^3 + x_2^4 + a_1 x_1 x_2^2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1 x_2 + a_4 x_2 + a_5 x_1)$	Символическая омбилическая точка

Рис. 1. Семь элементарных катастроф по классификации Рене Тома

Для решения задач энергетике при наличии одного переменного параметра, например, напряжения, применяется катастрофа типа «ласточкин хвост» (рис. 2), так как именно этот вид полноценно описывает поведение системы в случае изменения контролируемого параметра, в том числе при возникновении «лавины» изменения значения контролируемой величины. Суть данной катастрофы заключается в том, что управляющее пространство в данном типе катастроф является трехмерным. Каскад бифуркаций в фазовом пространстве состоит из трех поверхностей бифуркаций типа «свертка», которые встречаются на двух кривых бифуркаций с точками возврата, которые в конечном итоге встречаются в одной точке, представляющей собой бифуркацию типа «ласточкин хвост». По мере прохождения значений параметров по поверхностям областей бифуркаций типа «свертка» пропадает один минимум и один максимум потенциальной функции. В области бифуркаций с точкой возврата два минимума и один максимум замещаются одним минимумом; за ними бифуркации типа «свертка» исчезают. В точке ласточкиного хвоста два минимума и два максимума встречаются в одном значении переменной x . Для значений $a > 0$ за ласточкиным хвостом существует либо одна пара (минимум, максимум), либо не существует вообще никаких бифуркаций. Это зависит от значений параметров b и c . Две поверхности бифуркаций типа «свертка» и две линии бифуркаций с точками возврата встречаются при $a < 0$, а потому исчезают в самой точке «ласточкиного хвоста», заменяясь одной поверхностью бифуркаций типа «свертка».

Данный тип катастрофы позволяет наиболее точно определить поведение ЭЭС при воздействии внешних возмущений, так как количество учитываемых возмущений оптимально и не усложняет процессы расчета бифуркации. Также возможен учет действия и поведения еще одной величины, в случае ЭЭС, например, частоты.

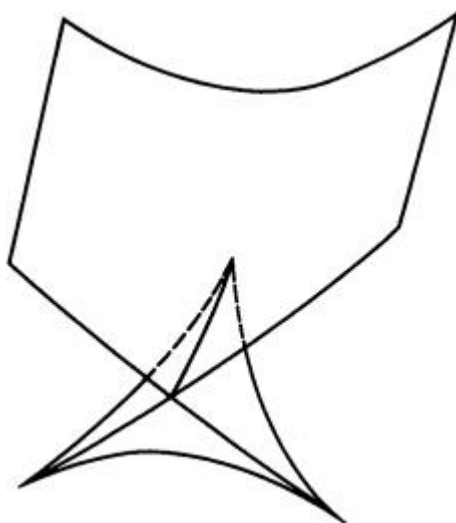


Рис. 2. Бифуркация типа «ласточкин хвост»

Теория катастроф имеет практическое применение в виде различного программного обеспечения. В энергетике основным ПО в данный момент является программно-технический комплекс RTDS (Real-Time Digital Simulator) фирмы RTDS Technologies Inc. (Канада). RTDS – это специализированный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе (ЭС) в реальном масштабе времени. Исследования ЭС высокого напряжения переменного и постоянного тока выполняются путем цифрового моделирования процессов с использованием алгоритмов, аналогичных тем, что используются в программах типа EMTP (Electromagnetic Transients Program).

RTDS позволяет решать следующие задачи:

- полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;
- полный цикл проверки систем управления для HVDC, SVC, TCSC и синхронных машин;
- разработка устройств FACTS и связанных с ней средств управления;
- изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;
- исследование взаимодействия оборудования для энергетики;
- изучение взаимодействия между объединенными AC/DC системами;
- обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Литература

1. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф / Р. Гилмор. – М. : Наука, 1966. – Т. 1. – 540 с.
2. Режим доступа: <https://www.vniir.ru/simcenter/about/>. – Дата доступа: 03.04.2021.