

¹ А. Н. Вакуленко
¹ К. А. Кобзарь
¹ А. В. Третьяк, канд. техн. наук
² П. Г. Гакал, д-р техн. наук,
¹ А. А. Паргала
^{1,2} Е. А. Овсянникова,
² М. И. Морозинский

¹ ГП завод «Электротяжмаш»,
г. Харьков

² Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

Ключові слова: гідрогенератор, ротор, тепловий стан, пошкодження, складно-напружений стан.

УДК 621.313.322-82

РАСПОЗНАВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ КРУПНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ И ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПУТЕМ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

Проведено аналіз можливих причин виникнення аварійних ситуацій гідрогенераторів (гідрогенераторів-двигунів) при різноманітних режимах роботи. Детально виконано механічний розрахунок складнонапруженого стану одного з елементів конструкції гідрогенератора-двигуна. Показані величини напружень, температур і переміщень в розрахунковому вузлі – міжполюсна перемичка. Обґрунтовано метод використання нейронних мереж для моделювання аварійних ситуацій гідрогенераторів, що забезпечує пошук оптимального розв'язку для запобігання відмові.

Введение

Проблема обеспечения безаварийной работы агрегатов ГЭС (гидроэлектростанций) и ГАЭС (аккумулирующих гидроэлектростанций) и турбогенераторов остаётся полностью не решённой в течение всего периода эксплуатации гидрогенераторов. Ввиду того, что данные виды электростанций покрывают пиковые нагрузки сети, то выход из строя единичной мощности может привести к значительным сбоям в энергосистеме в целом. В работах [1–3] детально описаны основные элементы конструкции гидрогенераторов, а также принципы проектирования.

Согласно требованиям ГОСТ и нормативных документов по проектированию и эксплуатации вышеуказанные типы электрических машин должны выдерживать нагрузки, превышающие номинальные в несколько раз, а промежуток времени критического режима может составлять до 5 мин.

Существует несколько типов аварийных ситуаций на электростанциях:

- аварии I категории;
- аварии II категории;
- отказы I категории;
- отказы II категории.

Наиболее тяжёлыми являются аварии I категории.

В настоящее время для оценки технического состояния гидрогенераторов на станциях размещены системы контроля, которые позволяют оценивать изменения основных параметров работы гидроагрегата, а техническое состояние отдельных узлов и деталей, как правило, оценивается с помощью визуального осмотра и дополнительных инструментальных средств.

При наличии на станциях экспертной системы, позволяющей распознавать аварийные ситуации крупных гидрогенераторов (гидрогенераторов-двигателей) в режиме реального времени с указанием причин возникновения и выработкой рекомендаций по предотвращению разрушения узлов конструкции, появится возможность предотвращать отказы в момент их зарождения. Математический аппарат экспертной системы должен будет способен оценивать и прогнозировать возникновение аварийных ситуаций, производить оценку времени до разрушения основных узлов с указанием мероприятий по предотвращению повреждения узлов гидроагрегата. Адаптация базы знаний экспертной системы также должна выполняться с учётом конструктивных особенностей гидроагрегата, на основании характерных нагрузок и режимов, в которых работал агрегат.

В случае появления на станциях экспертной системы, способной выполнять вышеуказанный анализ, отказы I и II категории могут быть предотвращены до момента их появления.

© А. Н. Вакуленко, К. А. Кобзарь, А. В. Третьяк, П. Г. Гакал, А. А. Паргала, Е. А. Овсянникова, М. И. Морозинский, 2015

Основные этапы решения поставленной задачи

При разработке экспертной системы должна быть создана база данных характерных параметров узлов генераторов, изменение которых и будет говорить о наличии различных процессов в конструкции, а именно:

- собственные частоты колебаний деталей;
- характерные температуры;
- напряжения;
- собственные частоты;
- «графические образы».

Вторым шагом решения задачи должен стать анализ изменения характерных параметров узлов генераторов в процессе появления дефектов и создание базы знаний, хранящей данные об изменении основных параметров конструкции в процессе зарождения, развития и конечном повреждении узлов. Поскольку развитие схожих дефектов может иметь одинаковые картины, то судить о возможном изменении параметров системы можно будет лишь с определённой долей вероятности, однако рекомендации по устранению будут способны решить проблему до её возникновения, что обеспечит повышение надёжности и увеличение срока эксплуатации генераторов.

Анализ целесообразно выполнять с использованием алгоритмов, которые позволяют определить причинно-следственные связи изменения основных параметров конструкции. Учитывая многофакторность задачи, наиболее приемлемым является алгоритм, основанный на применении нейронных сетей.

Результатом работы станет экспертная система, использующая алгоритмы нейронных сетей, базу данных и знаний, и которая в режиме реального времени станет анализировать техническое состояние генераторного парка станции. Появится возможность прогнозировать возможность возникновения аварийных ситуаций, отслеживать необходимость проведения регламентных работ, обеспечивать безаварийную работу генератора. База знаний будет объединять весь объем информации о различных аварийных ситуациях на гидроэлектростанциях Украины, обеспечивать дальнейшую возможность самообучения в режиме реального времени.

Таким образом, необходимо решить следующие задачи:

1. Математическое моделирование изменений «параметров конструкции» для возможных аварийных ситуаций:



Рис. 1. Перемещение межполюсной перемычки

- тепловой расчёт в номинальном и критическом режиме;
- механический расчёт, учитывающий различные режимы работы;
- расчёт собственных частот колебаний узлов;
- механический расчёт с учётом возможных повреждений.

2. Создать базу знаний характерных разрушений и изменений конструкций при возникновении дефектов.

3. Разработать алгоритм, способный в режиме реального времени производить анализ и контроль состояния узлов и деталей гидроагрегата, проводить самообучение.

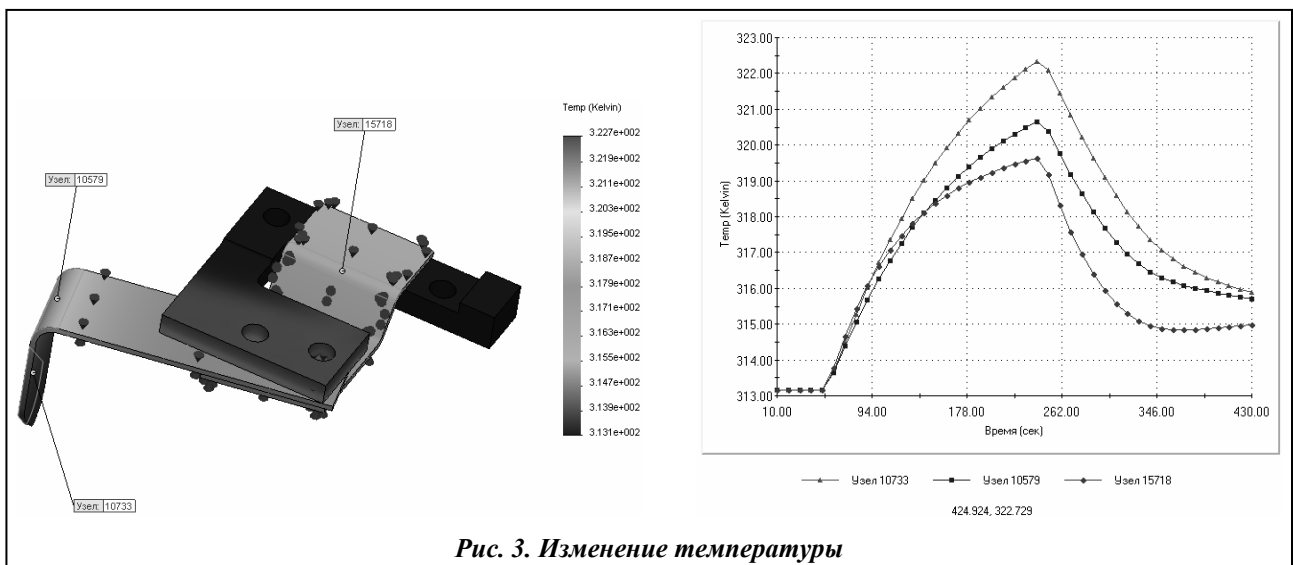
Определение характерных параметров узла

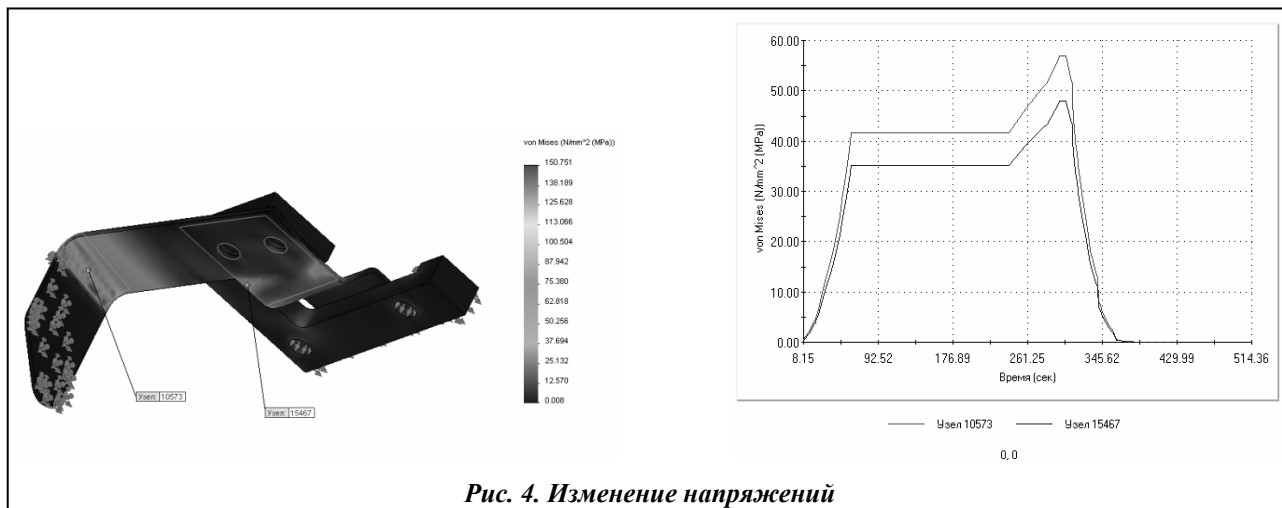
На примере узла «Межполюсная перемычка», выполняющего функции соединения электрической цепи полюсов между собой, рассмотрим характерные нагрузки, возникающие во вращающихся деталях электрической машины (ЭМ). Нагрузки, воспринимаемые узлом, вызваны тепловым нагревом и действием центробежной силы.

Данные, полученные в результате механического расчёта, выполненного согласно рекомендациям по проектированию гидрогенераторов, свидетельствуют: напряжения в узле составят не более 50 МПа, что удовлетворяет требованиям к медным соединениям. Однако данный расчёт имеет ряд существенных недостатков, к которым следует отнести то, что узел был рассчитан при «статическом» режиме, максимальная частота вращения являлась угонной (предельно возможная частота вращения ротора при наиболее неблагоприятном отказе системы регулирования подачи воды в турбину), тепловые нагрузки, а также изменение нагрузки во времени не были учтены. На рис. 1 показана деформация межполюсной перемычки в режиме короткого замыкания (к. з.).

Причины разрушения узла могли быть вызваны следующими факторами: неправильная работа автоматики, повышенное время работы в режиме к. з., разупрочнение болтового соединения. Как видно из рис. 2, до повреждения перемычки изменилась геометрия конструкции и характерное тепловое поле, о чем свидетельствует изменение цвета различных участков узла.

Для выполнения более точного расчёта механических напряжений в конструкции была разработана модель, учитывающая температурные нагрузки, изменение частоты вращения во времени (рис. 2), изменение характера охлаждения узла при разных частотах вращения. Основные методики





проведения тепловых расчётов указаны в [1–3].

Для анализа прочности узла на всех режимах его работы с учётом теплового состояния использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе SolidWorks Simulation.

Изменение температуры в различных точках переключки с изменением по времени представлено на рис. 3, графики изменения напряжений и перемещений – на рис. 4 и 5 соответственно.

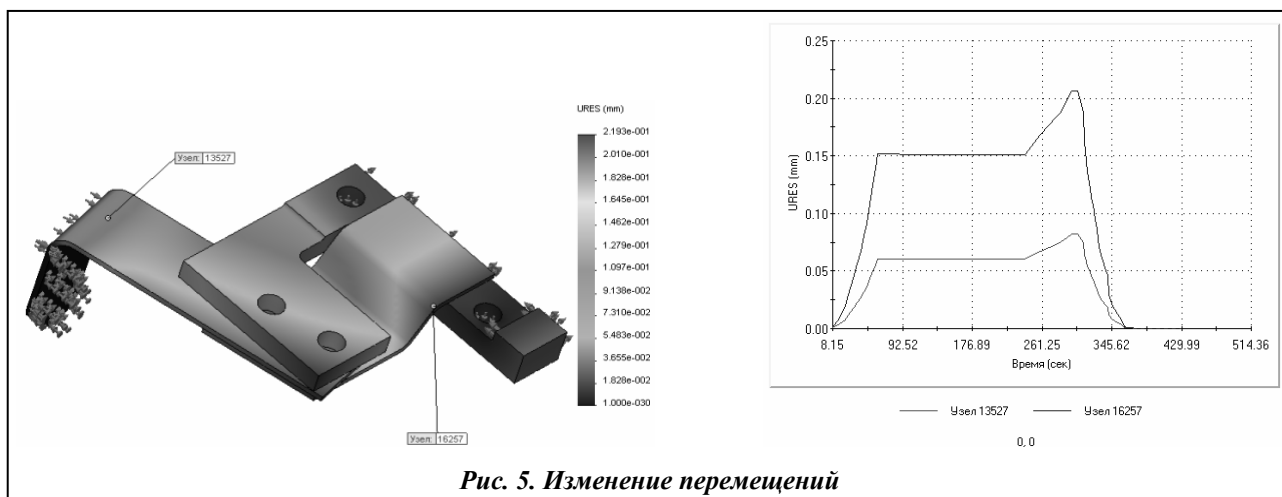
Как следует из полученных результатов, изменение температурного режима оказывает влияние на работу вышеуказанного узла. Расчёт позволил определить не только максимальные напряжения, но и характер их изменения во времени. Учет возникновения различных перемещений в конструкции позволяет спрогнозировать разрушение конструкции до его появления. Для оценки времени до разрушения была применена зависимость среднего числа циклов до разрушения от амплитуды переменных напряжений, полученных на основе экспериментальных данных. Оценка показала, что время до разрушения узла с учётом установки дополнительных упоров составит более 30 000 циклов, что соответствует нормам по проектированию и эксплуатации гидрогенераторов.

Создание экспертной системы

Завершающим шагом по разработке экспертной системы является создание алгоритма, выполняющего анализ причин появления, развития и предотвращения повреждений. Алгоритм использует нейронные сети (НС).

Выбор структуры НС осуществляется в соответствии с особенностями и сложностью задачи. Конфигурации НС описаны в [7–8] и других изданиях. На рис. 6 представлена простейшая модель нейронной сети.

Одна из проблем использования НС состоит в том, что если задача не может быть сведена ни



к одному из известных типов, то разработчику приходится решать сложную проблему синтеза новой конфигурации. При синтезе обычно руководствуются следующими принципами: возможности сети возрастают с увеличением числа ее ячеек, плотности связей между ними и числом используемых элементов; введение обратных связей, наряду с увеличением возможностей сети, поднимает вопрос о ее динамической устойчивости; сложность алгоритмов функционирования сети (в том числе, например, введение нескольких типов синапсов – возбуждающих, тормозящих и др.) также способствует усилению возможностей НС. Процесс функционирования НС, то есть сущность действий, которые она способна выполнять, зависит от величин синаптических связей. Поэтому, задавшись определённой структурой НС, отвечающей какой-либо задаче, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов (некоторые синаптические связи могут быть постоянными). Этот этап называется обучением НС, и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этапе обучения, кроме параметра качества подбора весов, важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью, и их приходится выбирать на основе компромисса. Обучение НС должно выполняться посредством введения данных, полученных в результате механических расчётов с учётом прогнозирования аварийных ситуаций, с использованием данных, полученных в процессе эксплуатации станции, посредством введения характерных изменений параметров работы агрегата в различных условиях. Для выполнения этих целей представляется возможным использовать байесовскую сеть – графическую вероятностную модель, представляющую собой множество переменных и их вероятностных зависимостей. Байесовская сеть дает возможность прогнозировать, т. е. определять вероятность события при заданных причинах.

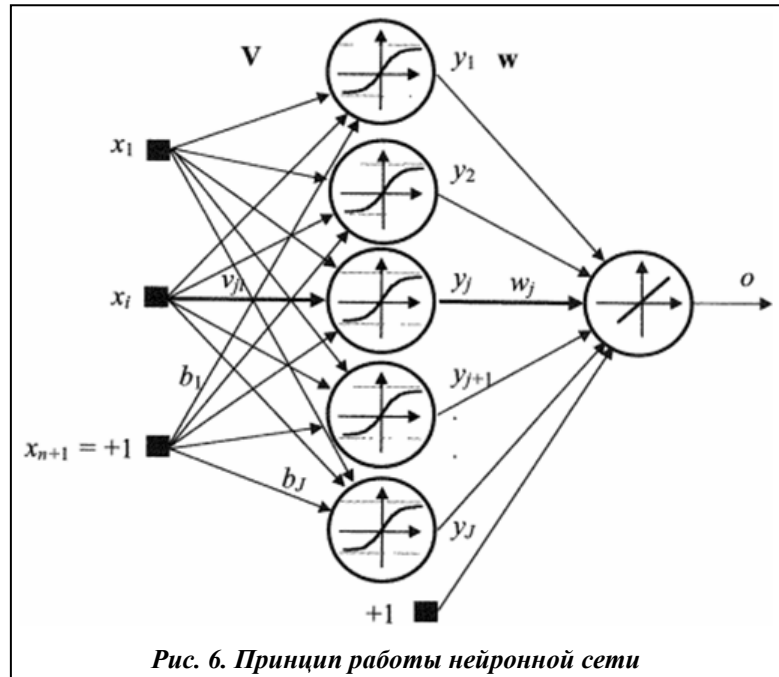


Рис. 6. Принцип работы нейронной сети

Использование байесовской сети позволит определять ресурс работы узлов в реальном времени, основываясь на режимах работы генератора, сигналах, передаваемых с датчиков температур, данных о вибрационном состоянии. В качестве исходных данных должны быть использованы основные параметры, представленные на примере межполюсной переемычки, для всех узлов и деталей гидрогенератора и их функциональное изменение.

Использование байесовской сети позволит определять ресурс работы узлов в реальном времени, основываясь на режимах работы генератора, сигналах, передаваемых с датчиков температур, данных о вибрационном состоянии.

В качестве исходных данных должны быть использованы основные параметры, представленные на примере межполюсной переемычки, для всех узлов и деталей гидрогенератора и их функциональное изменение.

Вывод

На основе вышеизложенного можно сделать вывод – разработка экспертной системы по обеспечению безаварийной работы агрегатов ГЭС и ГАЭС может быть реализована. Решение задачи существенно повысит надежность энергосистемы Украины. Учитывая существующие экспериментальные данные и выполненные механические расчёты, разработка и внедрение экспертной системы, способной производить оценку технического состояния гидрогенераторов с введением указаний по устранению аварийных ситуаций, представляются возможными без установки дополнительных систем контроля, при условии использования уже существующих на станциях систем.

Литература

1. Алексеев, А. Е. Конструкция электрических машин / А. Е. Алексеев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 427 с.

2. Данилевич, Я. Б. Добавочные потери в электрических машинах / Я. Б. Данилевич, Э. Г. Кашарский. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 214 с.
3. Кашарский, Э. Г. Потери и нагрев в массивных роторах синхронных машин / Э. Г. Кашарский, Н. Б. Чемоданова, А. С. Шапиро. – Л.: Наука, 1968. – 200 с.
4. Сыромятников, И. А. Режимы работы синхронных генераторов / И. А. Сыромятников. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 198 с.
5. *IEEE 522-1992. Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form Wound Stator Coils for Alternating Current Rotating Electrical Machines.* – Instead of IEEE 522-1977; approved 04.01.1993. – American National Standards Institute, 1993. – 19 p. – www.docin.com/p-391407879.html.
6. Nailen, R. L. Are Those New Motor Maintenance Tests Really That Great? / R. L. Nailen // *Electrical Apparatus Magazine.* – 2000. – January. – P. 31–35.
7. Battiti, R. First and second order methods for learning: Between steepest descent and Newton's method / R. Battiti // *Neural Computation.* – 1992. – Vol. 4, № 2. – P. 141–166.
8. Caudill, M. *Neural Networks Primer.* – San Francisco: Miller Freeman Publications, 1989. МА: the МГТ Press, 1992.

Поступила в редакцию 14.10.15