



ВАКУЛЕНКО А.Н., главн. констр. ГГ и КМПТ,
КОБЗАРЬ К.А., главн. конст. ГГ,
ТРЕТЬЯК А.В., канд. техн. наук, зав. сект. мех. расчетов
 ГП завод "Электротяжмаш", Харьков,
ГАКАЛ П.Г., канд. техн. наук,
ОВСЯННИКОВА Е.А., МОРОЗИНСКИЙ М.И., инж.,
 Национальный аэрокосмический университет
 им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

РАСПОЗНАВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ КРУПНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ (ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ — ДВИГАТЕЛЕЙ) ПУТЕМ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

Проведен анализ возможных причин возникновения аварийных ситуаций для гидрогенераторов (гидрогенераторов-двигателей) при различных режимах работы. Детально выполнен механический расчёт сложноподвижного состояния одного из элементов конструкции гидрогенератора-двигателя. Показаны величины напряжений, температур и перемещений в расчётном узле — межполюсная перемычка. Обоснован метод использования нейронных сетей для моделирования аварийных ситуаций гидрогенераторов, обеспечивающий поиск оптимального решения для предотвращения отказа.

Введение. Проблема обеспечения безаварийной работы агрегатов ГЭС и ГАЭС остается 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:

1. Аварии I категории;
2. Аварии II категории;
3. Отказы I категории;
4. 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 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.

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



Рис. 1. Перемещение межполюсной перемычки

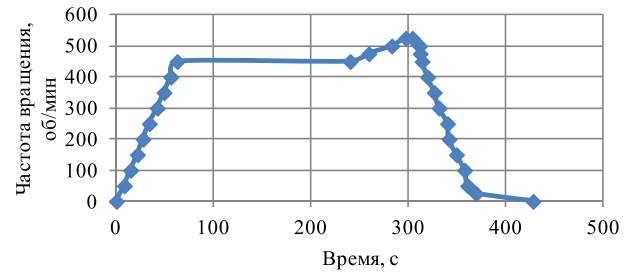


Рис. 2. График зависимости частоты вращения от времени

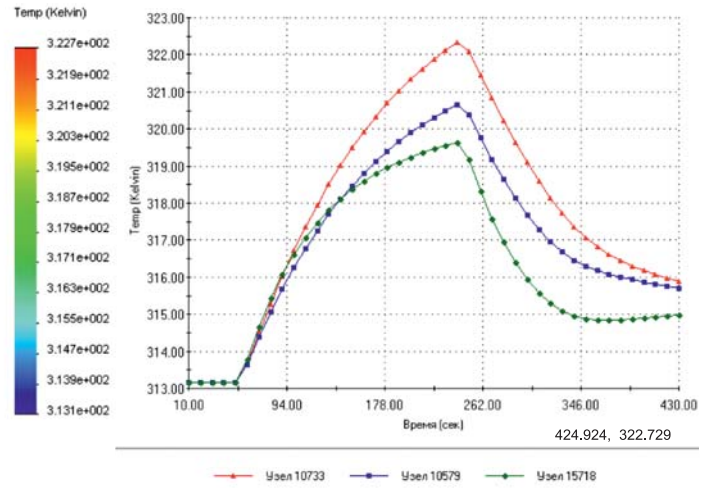
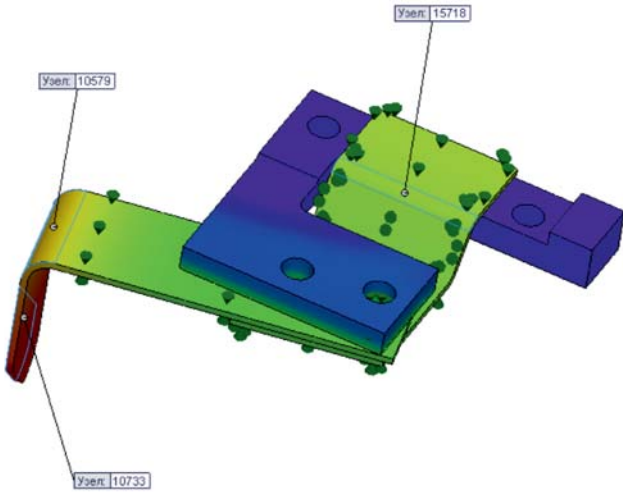


Рис. 3. Изменение температуры

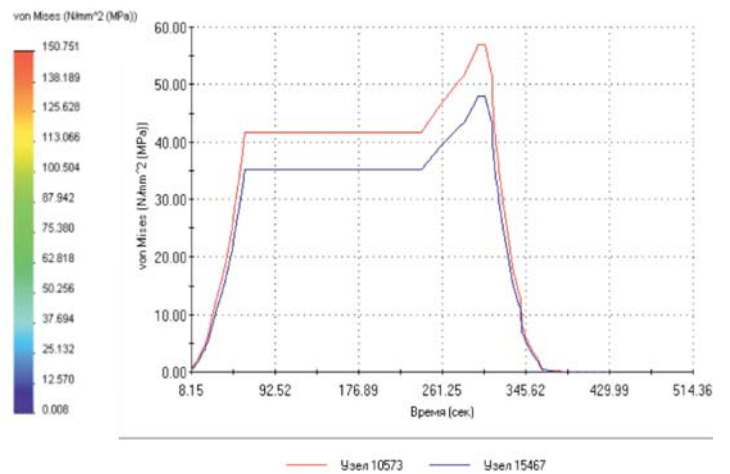
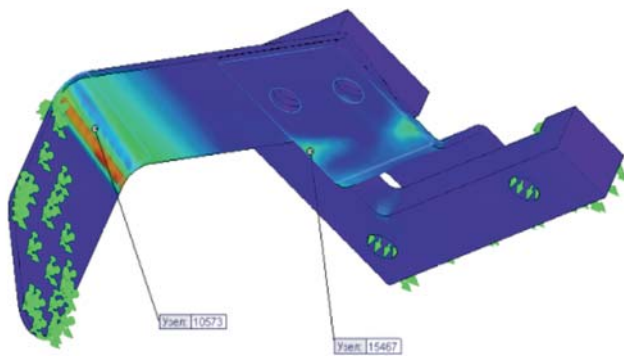


Рис. 4. Изменение напряжений

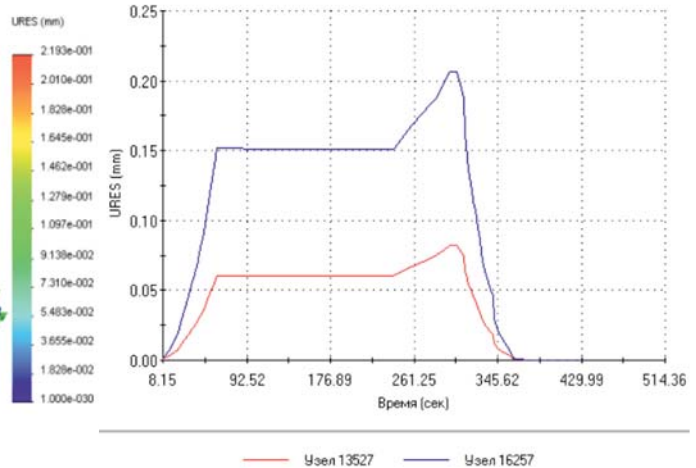
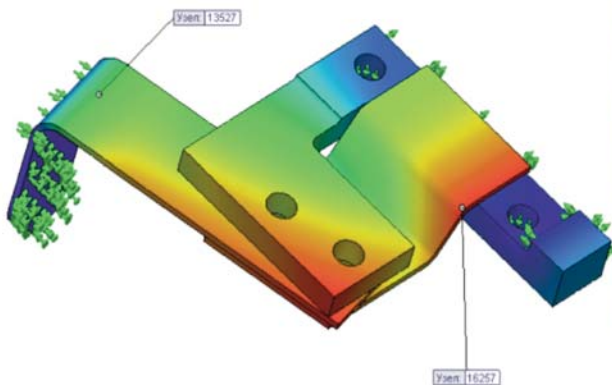


Рис. 5. Изменение перемещений



возможном изменении параметров системы можно будет лишь с определённой долей вероятности, однако рекомендации по устранению будут способны решить проблему до ее 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:

1.1 тепловой расчёт в номинальном и критическом режиме;

1.2 механический расчёт, учитывающий различные режимы работы;

1.3 определить собственные частоты колебания узлов;

1.4 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, что 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 приведено фото с деформацией межполюсной перемычки в режиме короткого замыкания (КЗ).

Причины разрушения узла могли быть вызваны следующими факторами: неправильная работа автоматики, повышенное время работы в режиме КЗ, 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 [4–6].

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 перемычки с изменением по времени представлено на Рис. 3. Графики изменения напряжений и перемещений представлены на Рис. 4, 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

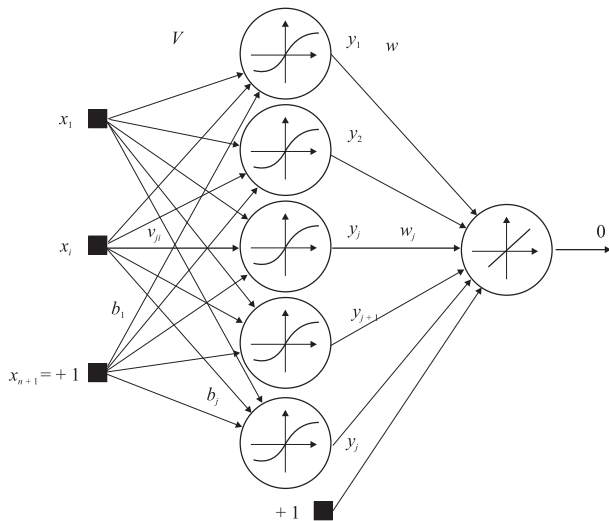


Рис. 6. Принцип работы нейронной сети

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 [7–11] 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 ячеек сети, плотности связей между ними и числом используемых элементов; введение обратных связей, наряду с увеличением возможностей сети, поднимает вопрос о динамической устойчивости сети; 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 позволяет прогнозировать, т.е. определять вероятность события при заданных причинах.

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 перемычки, 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 и должна быть реализована. 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, представляется возможным без установки дополнительных систем контроля, при условии использования уже существующих на станциях систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин/Государственное энергетическое издательство/— Москва. — 1958. — 428 с.
2. Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах/Государственное энергетическое издание. — Москва: — 1963. — 214с.
3. Данилевич Я.Б. Добавочные потери в турбо- и гидрогенераторах /Наука, Ленинград, — 1973. — 181 с.
4. Лаврентьев М.Н., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некорректные задачи математической физики и анализа. — М.: Наука, 1980. — 288 с.
5. Коздоба Л.А. Вычислительная теплофизика. — Киев.: Наукова думка, 1992. — 276 с.



6. *Моделирование* тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды./Под ред. акад. Петрова Г.И. — М.: Машиностроение, 1971. — 380 с.

7. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. Перевод на русский язык Ю.А. Зуев, В.А. Точенов. — 1992.

8. *Заенцев И.В.* Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие к курсу "Нейронные сети"

9. *Lippman R.P.* An introduction to computing with neural networks. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. — 1987. — April, P. 4–22.

10. *Perceptrons*, by Marvin Minsky and Seymour Papert, published by MIT Press, Cambridge Massachusetts, (1969)

11. *Галушкин А.И.* Синтез многослойных систем распознавания образов. — М.: Энергия, 1974.

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



УДК 556.537:532

ЩОДРО А.Е., докт. техн. наук,
проф. Национального университета водного хозяйства
и природопользования, г. Ровно

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА МЕСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА

Показано доцільність раціонального комбінування глобального і локального підходів при розрахунках місцевих розмивів біля берегів річок і річкових гідротехнічних споруд.

Показана цілесобразність раціонального комбінування глобального і локального підходів при расчетах місцевих розмивів у берегах рек і речних гідротехнічних спорудженій.

В работах [1, 2] показана необходимость рассмотрения процесса деформации грунта как процесса изменения его интенсивности во времени. Именно такой подход дает возможность проследить изменения в кинематической структуре потока, связанные с относительно небольшими изменениями размываемых границ потока на каждом временном интервале. Наш подход является локальным и в том смысле, что интенсивность выноса грунта определяется на данной вертикали потока (в данной точке дна), где определены все локальные свойства потока [2] Но в данной работе вводится иное понятие локальности воздействия потока на дно.

Далее показана методически целесообразная дифференциация условий размыва в связи с разными свойствами размываемых грунтов, обуславливающих применение одного из двух методических подходов, описанных ниже.

Рассмотрим **особенности взаимодействия турбулентного потока с руслом**. Целесообразность расчетов размыва в мелководном и практически однородном грунте следует из соображений подхода, основанного на задании коэффициента диффузии наносов при их отрыве от дна и проникновении в поток — εD . Исходя из этого далее развита соответствующая теоретическая концепция, называемая конвективно-массообменной или диффузионной [3]. Касательные турбулентные напряжения, действующие на поверхности грунта, являются первопричиной как сдвига от-

дельных частиц, лежащих на поверхности, так и их массового сдвига. Рассмотрен также вопрос о пульсации касательных напряжений, их влияния на отрыв частиц; о пульсациях давления и их проникновении в грунт. Расчеты, проведенные на основе развитой теории, показали, что все вышеупомянутые факторы учитываются значениями εD .

Взаимное влияние потока и его размываемого ложа характеризуется изменением геометрических очертаний его границ и изменением кинематических условий, связанных как с изменением геометрии границ, так и с насыщением потока наносами. Нами используется также гипотеза "замороженного дна", основанная на том факте, что поток приспосабливается к изменениям формы дна практически мгновенно, а дно меняет свою форму значительно медленнее. Размывающую способность потока можно оценивать *двумя способами*:

- по касательным напряжениям на дне и силе, передаваемой от потока на некоторый участок дна, безотносительно отдельных частиц, лежащих на дне,

- либо по силам, действующим на отдельные частицы и вызывающим их срыв.

Соответственно существует два направления в оценке условий начала смыва грунта или какой-то характерной стадии в развитии процесса его вымыва. Первое направление назовем глобальным, а второе — локальным подходом к оценке критических состояний или интенсивности