УДК 004.8, 004.94, 621.22

DOI: 10.15827/0236-235X.121.051-055

Дата подачи статьи: 12.12.17

2018. Т. 31. № 1. С. 051–055

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИМИТАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАГРЕГАТА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРА ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА

А.В. Никулина¹, *магистр, nikulina.anastasiya.v@yandex.ru***А.С. Зеленко**¹, *к.т.н., доцент, LZelenko@rambler.ru*

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, г. Самара, 443086, Россия

Тренажерная подготовка оперативного персонала *гидроэлектростанций* (ГЭС) – одна из наиболее эффективных форм профессионального обучения, поскольку она позволяет формировать навыки управления технологическими процессами как в нормальных, так и в аварийных условиях. Программный тренажер дает возможность максимально реалистично воссоздавать ход технологического процесса, включая индикацию, блокировки, логику работы реального оборудования. Это особенно важно для операторов ГЭС, деятельность которых связана с восприятием большого объема информации.

В статье рассмотрены требования к тренажеру оперативного персонала ГЭС и сценарии обучения. Приводятся примеры регистрируемых технологических параметров гидроагрегата и соответствующие им линии трендов.

Цель авторов – разработка модели гидроагрегата, позволяющей имитировать все режимы его работы и изменять значения его технологических параметров в интервалах, соответствующих реальным. Предложено рассматривать построение имитационной модели гидроагрегата как задачу восстановления регрессии, в качестве способа ее решения выбран механизм искусственных нейронных сетей. С помощью этого механизма можно моделировать сложный вид связей между технологическими параметрами гидроагрегата и определять будущие значения этих параметров с большой точностью. Кроме того, искусственная нейронная сеть хорошо обучается на реальных исторических данных, полученных из системы управления гидроагрегата.

Для моделирования параметров разработан программный модуль, в котором для группы из n выбранных для сценария входных параметров строится n трехслойных нейронных сетей с прямой передачей сигнала, то есть моделируется зависимость каждого из n параметров от остальных $(n-1)$ параметров. В статье приведены реализованные в модуле функции и сценарии.

Ключевые слова: ГЭС, оперативный персонал, тренажерная подготовка, гидроагрегат, технологические параметры гидроагрегата, имитационная модель гидроагрегата, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

В энергетике, являющейся частью мировой техногенной культуры, время от времени наблюдаются нештатные ситуации и крупные аварии, в том числе и по вине обслуживающего (оперативного) персонала. В статье [1] проведен анализ техногенной аварийности в РФ, названы основные внутренние и внешние причины аварийности на опасных производственных объектах. Анализ инцидентов с ошибками персонала показывает, что наибольшее количество ошибочных действий совершается в аварийных ситуациях, при пусках, остановах, при производстве плановых переключений и в процессе других воздействий на органы управления оборудованием. Частота ошибочных действий персонала зависит от его обученности навыкам управления оборудованием и готовности к парированию аварийных ситуаций. Причем, если навыкам проведения типовых и штатных переключений с известными ограничениями можно обучиться на реальном работающем оборудовании, то навыки ликвидации нештатных и аварийных ситуаций невозможно приобрести без применения современных тренажеров [2].

Таким образом, профессиональная подготовка персонала объектов электроэнергетики приобретает приоритетное значение в связи с критической ситуацией, складывающейся в Единой энергетиче-

ской системе России по обеспечению надежности ее функционирования, вызванной дефицитом энергетических мощностей, износом основных фондов и т.п. Аварийность на опасных производственных объектах (в том числе на электростанциях и сетевых предприятиях) в более чем 70 % случаев обусловлена так называемым человеческим фактором [3].

Для повышения надежности человеческого фактора предприятий критической инфраструктуры разрабатываются всевозможные технические средства обучения – от сложных программно-технических комплексов (полномасштабных тренажеров реального времени, позволяющих обучать оперативный персонал в различных эксплуатационных режимах) до компьютерных тренажеров, моделирующих работу отдельных технологических систем [4–7].

Эксплуатация *гидроагрегатов* (ГА) сопровождается постоянным контролем, регистрацией и расчетом технологических показателей его работы. Существует ряд параметров, получающихся в результате математической обработки зарегистрированных значений параметров, например, расход воды через ГА, коэффициент полезного действия ГА, время наработки ГА в каждом режиме и зоне работы. Как правило, функции текущего и перио-

дического контроля состояния оборудования, в том числе и статистический учет наработки ГА, возлагаются на оперативный персонал.

Авторы данной статьи принимают участие в разработке тренажера для эмуляции *технологических процессов* (ТП) ГЭС и работы общестанционных вспомогательных систем и оборудования в соответствии с реальными физическими ограничениями. Тренажер должен максимально реалистично воссоздавать ход ТП, включая индикацию, блокировки, логику работы реального оборудования, моделировать потенциально опасные ситуации на реальных объектах. В связи с этим актуальна разработка модели, позволяющей имитировать значения технологических параметров ГА ГЭС и построенного на ее основе программного тренажера.

Процесс работы на тренажере выглядит следующим образом.

1. Преподаватель выбирает сценарий обучения и начинает процесс тестирования, в ходе которого может воздействовать на модель путем изменения входных параметров.

2. Обучаемый осуществляет работы на *автоматизированном рабочем месте* (АРМ), где развернуты мнемосхемы, аналогичные мнемосхемам *верхнего уровня* (ВУ) АСУ ТП ГЭС; просматривает на мнемосхемах ход ТП; переключается между мнемосхемами, просматривает параметры, их линии трендов, выполняет управляющие воздействия при помощи элементов мнемосхем.

3. По окончании теста в автоматическом режиме производится оценка испытуемого.

Постановка задачи исследования

Цель работы – создание модели ГА, позволяющей имитировать все режимы его функционирования и изменять значения технологических параметров в интервалах, соответствующих реальным.

Модель ГА характеризуется набором входных и выходных параметров. Формирование выходных параметров модели осуществляется на основе фиксированного набора алгоритмов, которые выполняются с заданной периодичностью имитации (тактом). Для модели должны быть предусмотрены механизм отключения параметра от логики модели и переход на ручное задание параметров. Модель ТП может подключаться к модели системы автоматизированного управления, а при ее отсутствии частично описывать модель системы.

Описание метода решения задачи исследования

Каждому режиму работы ГА или возможной аварийной ситуации (пуск/останов ГА, повышение

температуры обмотки статора генератора, действие электрической защиты трансформатора на останов ГА, незатормаживание ГА при аварийном останове и т.п.) соответствует сценарий обучения тренажера, содержащий перечень имитируемых параметров, допустимые интервалы их изменения, события, привязанные ко времени.

Например, для сценария «Пуск ГА» имитируемыми параметрами будут следующие:

- скорость турбины;
- частота вращения турбины;
- давление воды в спиральной камере;
- давление воды на уплотнителе вала турбины;
- давление дисциллята на входе в обмотку статора;
- датчик положения направляющего аппарата;
- расход через уплотнение вала;
- расход дисциллята на обмотку статора.

Общую закономерность изменения ряда данных можно представить в виде линии трендов. На рисунке 1 приведены линии трендов значений технологических параметров ГА, на основании которых разрабатывается сценарий «Пуск ГА». Авторы предлагают рассматривать построение имитационной модели ГА как задачу восстановления регрессии.

Пусть заданы пространство объектов X и множество возможных ответов Y . Существует целевая зависимость $y^* : X \rightarrow Y$, значения которой известны только на объектах обучающей выборки $X^\ell = (x_i, y_i)_{i=1}^\ell$, $y_i = y^*(x_i)$. Требуется построить алгоритм a (функцию регрессии): $X \rightarrow Y$, аппроксимирующий целевую зависимость y^* [8].

При решении таких задач выделяют два этапа. На этапе обучения метод μ по выборке X^ℓ строит алгоритм $a = \mu(X^\ell)$. На этапе применения алгоритм a для новых объектов x выдает ответы $y = a(x)$. Метод обучения должен допускать эффективную программную реализацию.

Самым перспективным подходом к анализу больших данных считается применение методов машинного обучения, с помощью которых компьютер может находить в массивах данных изначально неизвестные взаимосвязи и закономерности [8].

При выборе метода построения модели необходимо учитывать следующие факторы:

- задача моделирования значений параметров ГА ГЭС требует анализа естественной информации большого объема: сотни параметров, изменения которых регистрируются с точностью до миллисекунд;
- технологические параметры ГА связаны между собой сложными функциональными зависимостями;

Рис. 1. Линии трендов значений технологических параметров ГА для сценария «Пуск ГА»

Fig. 1. Trend lines of hydroelectric set process values for the scenario "Start HES"

– со временем происходят износ оборудования ГА и естественное изменение его параметров.

В данной работе в качестве способа решения задачи восстановления регрессии выбран механизм искусственных нейронных сетей (ИНС). Это обусловлено следующими факторами:

- ИНС способны смоделировать сложный вид связей между технологическими параметрами ГА;
- ИНС позволяют определять будущие значения технологических параметров ГА с большой точностью;
- в процессе использования такая модель реагирует на изменения, происходящие с ГА, и автоматически корректирует параметры;
- в настоящее время разработаны и реализованы эффективные алгоритмы обучения ИНС в виде программных библиотек.

Прикладная интерпретация и иллюстрация полученных результатов исследования

Программной реализацией имитационной модели ГА является модуль работы с нейронными сетями [9]. В этом модуле для группы из n выбранных для сценария входных параметров строятся n трехслойных нейронных сетей с прямой передачей сигнала, то есть моделируется зависимость каждого из n параметров от остальных $(n - 1)$ параметров.

Набор обучающих данных для ИНС формируется по историческим трендам системы автоматизированного управления ГА ГЭС. Выбор параметров для определенного сценария осуществляется с

использованием корреляционного анализа: параметры, коэффициент корреляции которых больше установленного порогового значения, включаются в один сценарий.

Для обучения ИНС используется метод обратного распространения ошибки. Критерием остановки процесса обучения нейросети является достижение функционала качества установленного минимального значения. Погрешность имитации параметра ГА на временном интервале T выражается квадратичной функцией потерь $L(a, x) = (a(x) - y^*(x))^2$, где a – такое решение, при котором отклонение функции имитируемого параметра от функции $y = y^*(x)$ минимально. Функционал качества является суммой функций потерь на обучающей выборке объектов [8].

Разработанный программный модуль поддерживает выполнение следующих функций:

- чтение исторических значений моделируемых технологических параметров из файлов;
- подготовка обучающей выборки для ИНС;
- обучение нейросетей;
- построение модели для имитации значений технологических параметров ГА;
- анализ результатов работы системы моделирования (расчет погрешности моделируемых параметров);
- построение линий трендов исходных значений параметров и значений, рассчитанных ИНС;
- сохранение и загрузка нейросетей в систему.

ПО разрабатывается в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C# с использо-

Рис. 2. Экранная форма программного модуля

Fig. 2. Screen form of the software module

ванием фреймворка .NET Accord, реализующего модели машинного обучения и методы оценки их качества. ПО запускается автоматически при включении сервера в виде веб-приложения под управлением сервера IIS.

Пользовательский интерфейс (рис. 2) разработан с использованием следующих библиотек и инструментов:

- d3.js – библиотека JavaScript для управления документами на основе данных, используется для обработки и визуализации данных;
- amCharts – библиотека JavaScript для визуализации данных, используется для работы с трендами, графиками, диаграммами;
- bootstrap – инструмент с открытым исходным кодом для разработки с помощью HTML, CSS и JS, используется для построения пользовательского интерфейса с версткой под любые размеры экранов.

Приведем сценарии, реализуемые программным модулем.

Просмотр созданных нейросетей:

- в левой части формы в списке перечислены названия нейронных сетей;
- если выбрать одну из них, то в правой части экрана появляется информация: имя сети и перечень входных значений параметров;
- после изменения одного из входных значений параметров происходит вычисление значения параметра при помощи нейронной сети.

Создание новых нейросетей:

- пользователь загружает n файлов (по количеству параметров), содержащих метки времени и соответствующие значения параметра;
- система создает n нейронных сетей.

Просмотр линий трендов параметров:

- пользователь загружает файлы с исходными данными;
- пользователь выбирает набор ранее созданных нейронных сетей;
- пользователь выбирает временной интервал для построения трендов;
- для каждой нейронной сети строится набор трендов следующим образом: открывается файл; выбираются метки времени, удовлетворяющие временному интервалу; для каждой метки времени вычисляются значения параметра при помощи нейронной сети (в качестве входных данных используются данные из файла);
- для каждой нейронной сети доступны опции построения оригинального тренда и расчета минимального, максимального и среднего отклонений вычисленного значения от эталонного.

Заключение

Разработанная авторами модель имитации значений технологических параметров ГА и модуль работы с нейронными сетями, входящий в состав тренажера оперативного персонала, реализованный на ее основе, позволяют для каждого конкретного ГА ГЭС строить модель, отражающую изменения его параметров, и проводить обучение оперативного персонала на основе этой модели.

Литература

1. Магид С.И., Архипова Е.Н., Куличихин В.В. Актуальные вопросы развития тренажеростроения современной электроэнергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 2. С. 28–41.

2. Тренажеростроение в России и за рубежом. URL: <https://testenergo.ru/simulator-making-in-russia-and-abroad/> (дата обращения: 10.12.2017).
3. Тренажерная подготовка. Актуальность // Тренажеры для обучения оперативного персонала электростанций и сетевых организаций. URL: <https://testenergo.ru/tren-podgotovka/> (дата обращения: 10.12.2017).
4. Строганов И.Л. Применение автоматизированных компьютерных обучающих систем для предприятий критической инфраструктуры // Изв. ПГУПС. 2008. № 1. С. 297–310.
5. Южаков А.Ю. Тренажеры для оперативного персонала АЭС // Российской атомное сообщество. URL: <http://www.atomic-energy.ru/technology/33812> (дата обращения: 10.12.2017).
6. Тренажеры // ИТЦ «ДЖЭТ». 1991–2014. URL: <http://www.get-simulator.ru/index.php/ru/deyatelnost/trenazhery> (дата обращения: 10.12.2017).
7. ББЕФ. Модель гидроагрегата // Промавтоматика. URL: <http://pa.ru/ru/katalog/gidro/agregatnyj-uroven/BEF> (дата обращения: 10.12.2017).
8. Воронцов К.В. Математические методы обучения по прецедентам. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf> (дата обращения: 10.12.2017).
9. Никулина А.В., Трешников П.В., Хвостов А.И., Зеленко Л.С. Разработка имитационной модели гидроагрегата ГЭС для тренажера оперативного персонала // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017): сб. науч. тр. Междунар. науч.-технич. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. С. 805–808.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.121.051-055

Received 12.12.17

2018, vol. 31, no. 1, pp. 051–055

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR HYDROELECTRIC SET PROCESS VALUES FOR TRAINING OPERATION STAFF

A.V. Nikulina¹, Master of Science, nikulina.anastasiya.v@yandex.ruL.S. Zelenko¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, LZelenko@rambler.ru¹ Samara National Research University, Moskovskoe Highway 34, Samara, 443086, Russian Federation

Abstract. Training of a hydropower plants (HPP) operating personnel is one of the most effective means of professional training, as it provides an opportunity to train process control skills in a normal mode or in an emergency. A software simulator is intended for emulation of HPP technological processes, including indication, safety interlocks, and the behavior of real equipment. This is especially important for HPP operators since their work involves perception of big amounts of information.

The article describes the requirements to a simulator training for HPP operating personnel and training scenarios. The paper also provides some examples of hydroelectric set (HES) process values and their corresponding trend lines.

The purpose of the work is to develop a HES model that will allow simulating its modes and generating its process values in intervals corresponding to the real ones. The authors propose to consider building a HES simulation model as a problem of regression recovery. As an approach to solving the problem, the authors have chosen neural network technologies since they can simulate complex relationships between HES process values and determine its future values with high accuracy. In addition, artificial neural networks are well trained on real historical data obtained from a HES control system.

There is a developed special software module for simulation HU process values. It constructs n three-layer feedforward neural networks for a group of n selected for a certain scenario input values, i.e. it models the dependence of each of n values on the remaining $(n-1)$ ones. The paper also provides function and scripts implemented in this software module.

Keywords: hydropower plant (HPP), operations staff, training simulator, hydroelectric set, hydroelectric set process values, simulation model of a hydrounit, machine learning, artificial neural networks.

References

1. Magid S.I., Arkhipova E.N., Kulichikhin V.V. Topical issues of the development of simulators for modern electric power industry. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki* [Reliability and Safety of Power Engineering]. 2015, no. 2, pp. 28–41 (in Russ.).
2. *Trenazherostroenie v Rossii i za rubezhom* [Simulation Industry in Russia and Abroad]. Available at: <https://testenergo.ru/simulator-making-in-russia-and-abroad/> (accessed December 10, 2017).
3. *Trenazhernaya podgotovka. Aktualnost* [Simulator Training. Relevance]. Available at: <https://testenergo.ru/tren-podgotovka/> (accessed December 10, 2017).
4. Stroganov I.L. Application of automated computer training systems for critical infrastructure enterprises. *Izvestiya PGUPS* [Proc. Petersburg Transport University]. 2008, no. 1 (14), pp. 297–310 (in Russ.).
5. Yuzhakov A.Yu. *Trenazhery dlya operativnogo personala AES* [Simulators for Operational NPP Personnel]. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/technology/33812> (accessed December 10, 2017).
6. *Trenazhery. ZAO ITTs DZhet. 1991–2014* [Simulators. Engineering and Technology Center GET. 1991–2014]. Available at: <http://www.get-simulator.ru/index.php/ru/deyatelnost/trenazhery> (accessed December 10, 2017).
7. *BBEF. Model gidroagregata. Promavtomatika* [RACE Model of a Hydroelectric Set. Promavtomatika]. Available at: <http://pa.ru/ru/katalog/gidro/agregatnyj-uroven/BEF> (accessed December 10, 2017).
8. Vorontsov K.V. *Matematicheskie metody obucheniya po pretsedentam* [Mathematical Methods for Learning from Examples]. Available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf> (accessed December 10, 2017).
9. Nikulina A.V., Treshnikov P.V., Khvostov A.I., Zelenko L.S. Development of the simulation model of a hydraulic unit of hydroelectric power plant for operator training simulator. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii (PIT 2017): tr. Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* [Proc. Int. Science and Practice Conf. “Advanced Information Technologies” (PIT 2017)]. Samara, 2017, pp. 805–808 (in Russ.).