

Подход к заполнению пропусков в данных о функционировании гидроагрегата

С.И. Носков, В. А. Лисицын

Иркутский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе дан краткий обзор публикаций по применению методов математического моделирования при исследовании закономерностей функционирования гидроэлектростанций (ГЭС). В частности, рассмотрены: математические модели общего минимального потребления воды для каскадной гидроэнергетической системы в Китае; математическая модель гидроэнергетических установок; математическая модель двух малых ГЭС, работающих в тандеме; точное моделирование гидравлических переходных характеристик в сложной системе отводящего водовода. Сформулирована задача заполнения пропусков в данных, касающихся функционирования гидроагрегатов ГЭС. Предложено подход к ее решению базировать на использовании способа, описанного в прошлых публикациях одного из авторов и основанного на применении аппарата регрессионного анализа. Решена конкретная задача заполнения пропусков в данных для гидроагрегата одной из ГЭС Сибири. В качестве факторов использованы: активная и реактивная мощность электрогенератора, напряжение, ток и температура железа статора, ток ротора, температура горячего воздуха воздухоохладителя.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, электрогенератор, пропуски в данных, предиктивная аналитика, регрессионная модель, критерии адекватности.

Гидроэлектростанции (ГЭС) играют ключевую роль в энергетике многих стран, в том числе России, в которой обеспечивают около 20% всей вырабатываемой электроэнергии. Исследование закономерностей функционирования ГЭС проводится в том числе и с помощью методов математического моделирования. Так, в работе [1] разрабатываются математические модели общего минимального потребления воды для каскадной гидроэнергетической системы в Китае. Модели помогают решить проблемы рационального распределения графика генерации в каскадной

гидроэнергетической системе, получившей контракт на торгах на подключение к сети. В [2] представлена математическая модель гидроэнергетических установок, в частности модель системы регулятора для различных условий эксплуатации, основанная на базовой версии программного обеспечения TOPSYS. Математическая модель состоит из восьми уравнений турбины, одного уравнения генератора и одного уравнения регулятора. В исследовании [3] приведен обзор работ по анализу эксплуатационных аспектов гидроэлектростанций, способствующих выработке энергии с минимальными эксплуатационными расходами, а также минимальным воздействием на окружающую среду. Публикация [4] посвящена анализу причин вибраций, зависящих от неуравновешенных гидравлических сил во вращающемся и невращающемся оборудовании в гидроустановках в рамках стандартов измерения вибрации. В работе [5] представлена математическая модель двух малых ГЭС, работающих в тандеме. В обзорной статье [6] авторы попытались в целом классифицировать исследовательскую работу, сделанную до сих пор на основе разработки модели гидроэлектростанции и проектирования ее контроллера по различным разделам. В [7] предоставлены общие рекомендации в отношении экономичного проектирования и практической реализации основных компонентов малых гидроэлектростанций и их взаимодействия. В исследовании [8] проводится точное моделирование гидравлических переходных характеристик в сложной системе отводящего водовода и раскрываются возможные схемы подавления колебаний со стороны источника.

Заслуживают внимания также следующие публикации: [9] (выбор эффективного состава работающего оборудования на ГЭС), [10] (моделирование зависимости среднего уровня воды в р. Обь по Новосибирскому водному посту от скорости ее сброса на ГЭС), [11]

(прогнозная математическая модель процесса перемещений контролируемых точек гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС), [12] (математическая модель формирования речного стока, а также ее применение для долгосрочного прогноза притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС), [13] (математическая модель для выбора настроек микропроцессорных регуляторов возбуждения генераторов Братской ГЭС).

Основной подсистемой ГЭС является ее гидроагрегат, преобразующий энергию напора воды в электроэнергию. В его состав входят гидротурбина и гидрогенератор. Обычно гидрогенератор представляет собой синхронную явно полюсную электрическую машину вертикального исполнения, которая приводится во вращение от гидротурбины. Конструкция гидрогенератора в основном зависит от параметров гидротурбины, которые, в свою очередь, определяются природными условиями в районе строительства электростанции: напором и расходом воды. По этой причине каждая отдельная гидроэлектростанция обычно оснащена специально спроектированным для нее гидрогенератором.

В ходе эксплуатации оборудования актуальной является так называемая предиктивная аналитика состояния гидроагрегата в режиме реального времени. Для анализа технологических процессов оборудования обычно используются несколько предиктивных моделей, каждая из которых содержит показания датчиков, поступающие в режиме реального времени, матрицу нормального состояния оборудования и набор смоделированных значений для каждого наблюдения фактического набора данных. Каждая модель привязана к определённой части или процессу гидроагрегата, а поступающие в модель параметры с датчиков взаимосвязаны друг с другом и в большинстве случаев изменение одного параметра модели влечёт за собой изменение остальных и наоборот.

При обучении предиктивных моделей нередко возникает ситуация, когда подлежащие обработке данные имеют пропуски отдельных элементов. Это может быть вызвано временной неисправностью (сбоем) измерительной аппаратуры при снятии различных технических характеристик или сбоями в системе приёма и обработки входящих сигналов. Весьма часто пропуски возникают при ремонте или замене датчика и могут иметь как краткосрочный, длиной несколько секунд, так и долгосрочный характер, когда датчик на длительное время отключен от работы.

Формальная постановка задачи может быть представлена следующим образом. Пусть задана матрица X наблюдений за функционированием гидроагрегата:

$$X = \|x_{ki}\|, \quad k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m},$$

где x_{ki} – значение i -го показателя (фактора, сигнала) в k -ом наблюдении, n и m соответственно – числа наблюдений и показателей.

Пусть матрица X по указанным выше причинам содержит пропуски. Как указано в [14], в таких случаях можно исключать из рассмотрения соответствующие наблюдения или факторы и оставшуюся "комплектную" матрицу обрабатывать традиционным образом. Однако в условиях так называемых малых или средних выборок (а именно с ними чаще всего приходится иметь дело, например, при моделировании социально-экономических и технических систем) такое искусственное «усечение» данных является слишком расточительным вследствие потери полезной информации. Гораздо рациональнее использовать один из соответствующих методов заполнения пропусков (см., например, [15-17]). Идея одного из них состоит в следующем [14]. Вначале матрица разбивается на две части – комплектную и некомплектную. На основе первой строятся регрессионные модели, зависимыми переменными в которых являются факторы, по которым

имеются пропуски. После этого модели используются в режиме прогнозирования непосредственно для заполнения пропусков.

Продемонстрируем, как этот подход реализуется на практике на основе статистических данных для гидроагрегата одной из ГЭС Сибири. Введем следующие обозначения:

x_1 - активная мощность, МВт;

x_2 - реактивная мощность, МВт;

x_3 - напряжение статора, В;

x_4 - ток ротора, А;

x_5 - ток статора, А;

x_6 - температура горячего воздуха воздухоохладителя, °С;

x_7 - температура железа статора °С.

В табл. 1 приведены двадцать измерений этих показателей за два часа.

Таким образом, имеют место 8 пропусков - все для фактора x_7 . По комплектной части матрицы из 12 наблюдений методом наименьших квадратов построим линейную регрессионную модель:

$$x_{k7} = -22.93 - 0.067x_{k1} - 0.15x_{k2} - 1.51x_{k3} + 40.53x_{k4} + 0.76x_{k5} + 1.22x_{k6} + \varepsilon_k, k=1,12, R=0.999749, F=3317.597, E=0.46\%. \quad (1)$$

Здесь ε_k – ошибки аппроксимации, R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера, E – средняя относительная ошибка аппроксимации. Значения этих критериев адекватности указывают на весьма высокое качество модели (1), делая ее «почти функциональной».

Подставляя в (1) соответствующие значения переменных $x_i, i=1,6$ из некомплектной части матрицы X , получим следующие вычисленные значения пропусков:

$$x_{27} = 53.8642, x_{47} = 54.7254, x_{57} = 54.4398, x_{87} = 52.7185,$$

$$x_{97} = 51.1248, x_{10,7} = 50.5147, x_{16,7} = 59.2468, x_{17,7} = 59.0619.$$

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	200.851	109.355	16.87	1.8337	8.75	42.0078	53.7501
2	200.756	111.799	16.88	1.8432	9.15	41.8557	#
3	219.635	111.796	16.87	1.8736	9.1	41.7036	53.5805
4	220.178	119.666	16.95	1.9057	9.23	42.5656	#
5	220.443	131.6499	17.01	1.9535	9.38	42.2106	#
6	220.152	117.784	16.90	1.8988	9.18	42.0585	54.1806
7	220.178	118.228	16.92	1.8997	9.24	41.3994	53.3196
8	220.116	108.41	16.86	1.8615	9.06	40.9937	#
9	220.24	125.387	16.97	1.9257	9.31	39.6247	#
10	219.754	109.196	16.78	1.8571	9.12	39.2698	#
11	192.902	129.953	17.09	1.9049	9.05	46.4191	59.2988
12	195.111	134.262	17.1	1.9248	8.64	46.6477	59.251
13	192.763	134.119	17.13	1.9214	8.95	46.4191	59.2988
14	197.095	146.857	17.18	1.9795	8.93	46.4191	59.251
15	193.218	141.995	17.14	1.9535	8.75	46.4191	59.251
16	192.026	141.17	17.15	1.9517	8.69	46.4191	#
17	193.086	137.765	17.1	1.9352	8.65	46.4191	#
18	216.373	129.64	17.05	1.9378	9.18	46.3177	59.2032
19	220.049	95.832	16.73	1.8059	8.88	46.1148	58.6291
20	214.767	90.559	16.7	1.7799	8.7	46.1655	58.7248

Заключение

В работе поставлена задача заполнения пропусков в данных, связанных с функционированием гидроагрегатов. Предложено подход к ее решению

основывать на использовании метода, описанного в прошлых публикациях одного из авторов и основанного на применении аппарата регрессионного моделирования. Решена конкретная задача заполнения пропусков в данных для гидроагрегата одной из ГЭС Сибири.

Литература

1. Ji-Qing Li, Miguel A. Mariño, Chang-Ming Ji & Yu-Shan Zhang, Mathematical Models of Inter-plant Economical Operation of a Cascade Hydropower System in Electricity Market // *Water Resources Management*, 2009, Vol. 23, pp. 2003–2013.
2. Weijia Yang, Weijia Yang, Wencheng Guo, Wei Zeng, Chao Wang, Linn Saarinen, Per Norrlund, A Mathematical Model and Its Application for Hydro Power Units under Different Operating Conditions // *Energies*, 2015, Vol. 8(9), pp. 10260-10275.
3. Vineet Kumar Singh, S.K. Singal, Operation of hydro power plants-a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 69, pp. 610-619.
4. Gökhan Kahraman, Osman Özdemir, Mathematical modeling of vibration failure caused by balancing effect in hydraulic turbines // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2021, Vol. 51, Is. 3, pp. 1489-1500.
5. Gökhan Kahraman, Modeling of Optimal Power Generation in Small Hydropower Plants // *Journal of Energy Resources Technology*, 2024, Vol. 146(4).
6. Nand Kishor, R.P. Saini, S.P. Singh, A review on hydropower plant models and control // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, Vol. 11, Is. 5, pp. 776-796.
7. Hira Singh Sachdev, Ashok Kumar Akella, Niranjana Kumar, Analysis and evaluation of small hydropower plants: A bibliographical survey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 51, pp. 1013-1022.

8. Yang Zheng, Qijuan Chen, Donglin Yan, Haiku Zhang, Equivalent circuit modelling of large hydropower plants with complex tailrace system for ultra-low frequency oscillation analysis // *Applied Mathematical Modelling*, 2022, Vol. 103, pp. 176-194.

9. Летун В.М., Русина К.К. Использование математических моделей работы ГЭС при оптимизации режимов гидротепловых энергосистем // *Энергетик*, 2014, № 10, с. 7-8.

10. Логачёв А.В., Логачёва О.М., Карпик П.А. математическая модель зависимости уровня воды в реке оби от сброса воды на ГЭС // *Вестник НГУЭУ*, 2020, № 2, с. 177-182.

11. Гуляев Ю.П., Хорошилов В.С., Кобелева Н.Н. построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004-2007 ГГ.) // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2015, № 4, с. 16-20.

12. Бураков Д.А., Адамович А.А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища енисейских ГЭС с применением математической модели // *Метеорология и гидрология*, 2006, № 1, с. 95-105.

13. Игнатъев И.В., Степанов А.А. Математическая модель для выбора настроек микропроцессорных регуляторов возбуждения генераторов Братской ГЭС // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки - развитию регионов*, 2005, Т. 1, с. 3-5.

14. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск, Облформпечать, 1996, 320 с..

15. Литтл Р.Дж., Рубин Д.Б. Статистический анализ данных с пропусками. Финансы и статистика, 1991, 334 с.

16. Никифоров А.М. Разработка и исследование статистических методов распознавания образов с самообучение и обработка неполных данных. Дис. канд. физ.-мат.наук. // 1987, 144 с.

17. Носков С.И., Бычков Ю.А. Простой способ заполнения пропусков в данных // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем, 2017, № 19, с. 130-136.

References

1. Ji-Qing Li, Miguel A. Mariño, Chang-Ming Ji & Yu-Shan Zhang, Water Resources Management, 2009, Vol. 23, pp. 2003–2013.
2. Weijia Yang, Weijia Yang, Wencheng Guo, Wei Zeng, Chao Wang, Linn Saarinen, Per Norrlund Energies, 2015, Vol. 8(9), pp. 10260-10275.
3. Vineet Kumar Singh, S.K. Singal Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Vol. 69, pp. 610-619.
4. Gökhan Kahraman, Osman Özdemir Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2021, Vol. 51, Is. 3, pp. 1489-1500.
5. Gökhan Kahraman Journal of Energy Resources Technology, 2024, Vol. 146(4) p. 042101.
6. Nand Kishor, R.P. Saini, S.P. Singh Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, Vol. 11, Is. 5, pp. 776-796.
7. Hira Singh Sachdev, Ashok Kumar Akella, Niranjana Kumar Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, Vol. 51, pp. 1013-1022.
8. Yang Zheng, Qijuan Chen, Donglin Yan, Haiku Zhang Applied Mathematical Modelling, 2022, Vol. 103, pp. 176-194.
9. Letun V.M., Rusina K.K. Энергетик, 2014, № 10, pp. 7-8.
10. Logachyov A.V., Logachyova O.M., Karpik P.A. Vestnik NGUE`U, 2020, № 2, pp. 177-182.



11. Gulyaev Yu.P., Xoroshilov V.S., Kobeleva N.N. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Geodeziya i ae`rofotos``emka, 2015, № 4, pp. 16-20.
12. Burakov D.A., Adamovich A.A. Meteorologiya i gidrologiya, 2006, № 1, pp. 95-105.
13. Ignat`ev I.V., Stepanov A.A. Matematicheskaya model` dlya vy`bora nastroek mikroprocessorny`x regulyatorov возбуждениya generatorov Bratskoj GE`S [A mathematical model for selecting the settings of microprocessor regulators of excitation of generators of Bratskaya HPP] Trudy` Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenny`e i inzhenerny`e nauki - razvitiyu regionov, 2005, T. 1, p. 3-5.
14. Noskov S.I. Texnologiya modelirovaniya ob`ektov s nestabil`ny`m funkcionirovanem i neopredelennost`yu v danny`x [Technology for modeling objects with unstable functioning and uncertainty in data]. Irkutsk, Oblinformpechat`, 1996, 320 p.
15. Littl R.Dzh. Rubin D.B. Statisticheskij analiz danny`x s propuskami [Statistical analysis of data with omissions] Finansy` i statistika, 1991, 334 p.
16. Nikiforov A.M. Razrabotka i issledovanie statisticheskix metodov raspoznavaniya obrazov s samoobuchenie i obrabotka nepolny`x danny`x. [Development and research of statistical methods of self-learning pattern recognition and processing of incomplete data] Dis. kand. fiz.-mat.nauk. 1987, 144 p.
17. Noskov S.I., By`chkov Yu.A. Informacionny`e texnologii i problemy` matematicheskogo modelirovaniya slozhny`x sistem, 2017, № 19, pp. 130-136.

Дата поступления: 30.08.2024

Дата публикации: 01.10.2024