

УДК: 004.89

1.12. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ НА АЛЮМИНИЕВОМ ЗАВОДЕ

Ножко С.И., Зенкин Е.Ю., Бондарев К.А., Соболева И.П.
РУСАЛ Братский алюминиевый завод

В статье приводится практический опыт внедрения машинного обучения на алюминиевом заводе. Показано, что алюминиевый завод является предприятием с большим (более двух тысяч идентичных производственных объектов – электролизеров) количеством объектов анализа, по каждому из которых существуют сотни различных технических параметров эксплуатации объекта; взаимосвязи между параметрами эксплуатации определить классическими методами анализа затруднительно. Эти обстоятельства делают алюминиевое производство идеальным кандидатом для внедрения элементов искусственного интеллекта в производственный процесс. В ходе внедрения машинного обучения на алюминиевом заводе были проведены стадии пассивного и активного экспериментов, разработана методика определения эффективности проведенных мероприятий. Внедрение методов машинного обучения позволяет оптимизировать трудозатраты основного технологического персонала, при этом повысить эффективность производства.

Введение

Электролитическое производство алюминия — весьма энергоемкий процесс, поэтому очень важным является полнота использования тока (токовая эффективность, выход по току) в процессе [1]. В современной литературе есть упоминание о процессах, которые существенно влияют на токовую эффективность работы алюминиевого электролизера: это образование и последующее окисление карбида алюминия [2], окисление мелкодисперсных капель алюминия [3, 4], электронная проводимость [5, 6], прямое замыкание анода на катодный металл [7], наличие многовалентных примесей, например фосфора [8].

Разрозненные исследования по влиянию факторов стали основой для создания моделей, которыми обогатилась промышленная практика большинства алюминиевых компаний [9-18]. Наличие множества противоречивых моделей производительности электролизера свидетельствует, в том числе, о том, что задача разработки модели классическими статистическими методами не решается с необходимым уровнем адекватности, поэтому существует технологическая целесообразность в использовании иных методов, направленных на увеличение токовой эффективности алюминиевых электролизеров.

Текущая ситуация. Дедуктивное обучение

Для оценки целесообразности использования методов дедуктивного машинного обучения в целях увеличения производительности алюминиевых электролизеров было организовано накопление в базе данных экспертных мнений причин снижения производительности конкретных электролизеров. В качестве экспертного использовались мнения мастеров-технологов тех корпусов электролиза, в которых были выявлены электролизеры, снизившие производительность до 82% и менее за 30-суточный период

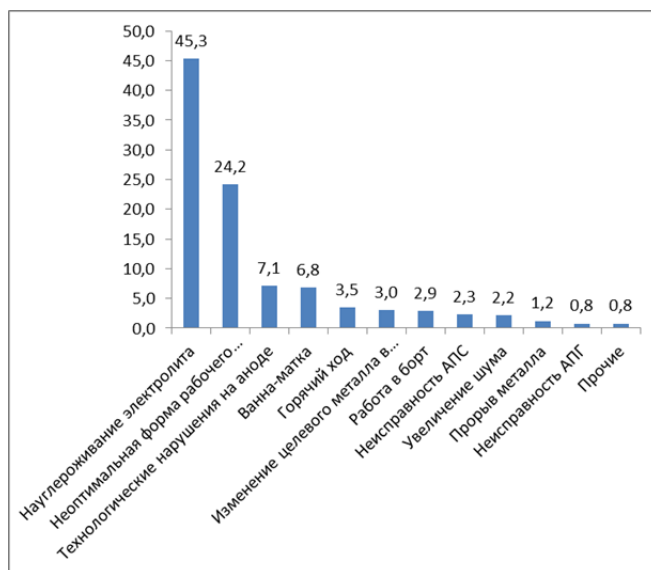


Рис. 1. Распределение причин снижения производительности электролизеров

в течение года. Выборка составила несколько тысяч электролизеров. Причины снижения производительности отображались в базе данных. Уже на этом этапе стало очевидным, что электролизное производство ввиду своей многоагрегатности и, к сожалению, достаточно частого снижения производительности агрегатов является практически идеальным объектом для внедрения методов машинного обучения. Экспертные мнения линейных мастеров в корпусах электролиза (коих удалось набрать несколько десятков тысяч) были систематизированы. Во многом, конечно, это был субъективный подход, однако это позволило с незначительной статистической погрешностью получить любопытные результаты (рис. 1).

Таким образом, основными причинами снижения производительности электролизеров стали «науглероживание электролита», «неоптимальная форма рабочего пространства» и «технологические нарушения на аноде».

Дедуктивное обучение позволило не только систематизировать причины снижения производительности электролизеров, но и доказать ранее озвученный тезис о том, что классические статистические методы не позволяют достоверно смоделировать причины снижения производительности электролизеров. Группа электролизеров (несколько тысяч наблюдений), снизивших производительность ниже 82% выхода по току, статистически мала относительно группы нормально работающих электролизеров (рис. 2), поэтому при использовании классических методов статистического анализа данных электролизерами этой группы зачастую пренебрегают как непоказательными. В свою очередь, эти электролизеры, хоть и не изучаются вследствие определенной малочисленности и аномальности технологического поведения, существенно влияют на производительность всей совокупности электролизеров алюминиевого завода. Эти электролизеры живут по своим технологическим законам, существенно отличающимся от законов технологии нормально работающих электролизеров.

В рамках дедуктивного обучения также было определено, что большинство причин снижения производительности электролизеров находится не в плоскости некорректности параметров эксплуатации (в том числе работы АСУ ТП) или конструкции, а в плоскости операционной деятельности персонала: качества и своевременности выполняемых персоналом технологических операций. Из чего был сделан логичный вывод, что для недопущения снижения производительности электролизера следует использовать методы прогнозной аналитики с последующим предупредительным проведением внеплановых технологических операций на электролизере, которые будут направлены на недопущение установленных ранее причин снижения производительности: «науглероживания электролита», «неоптимальной формы рабочего пространства» и «технологических нарушений на аноде». Ввиду того, что с помощью алгоритмов АСУ ТП устранить указанные нарушения в работе электролизеров невозможно, корректирующие действия через систему АСУ ТП в рамках данной работы не рассматривались. Для концентрации усилий в генеральном направлении — повышении производительности электролизеров — в рамках данной работы не проводилась оценка мероприятий, направленных на улучшение качества металла и расходных коэффициентов по сырью.

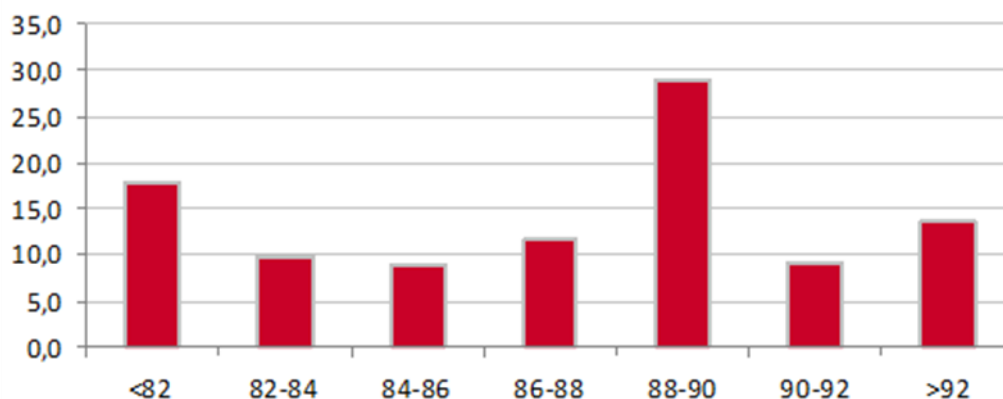


Рис. 2. Распределение группы электролизеров по производительности (выходу по току)

Индуктивное обучение

Индуктивное обучение, как было указано выше, основано на выявлении закономерностей в совокупности параметров, причем эти закономерности не всегда могут быть очевидны исследователю. Иногда определенная совокупность параметров может дать итоговый результат, качественно отличающийся от ожиданий исследователя. Индуктивное обучение в конкретном случае было направлено на прогнозирование снижения производительности алюминиевого электролизера на горизонте планирования два-три дня до наступления негативного события — снижения производительности. Данный горизонт был определен еще при проведении дедуктивного обучения как функция операционных возможностей персонала провести весь комплекс технологических мероприятий на электролизере в максимально сжатые сроки.

На первом этапе был создан (точнее, воспроизведен из базы данных) банк технологических параметров электролизеров, которые пропускались от выливки, т.н. технологический сценарий. Современное развитие систем анализа данных практически не имеет ограничений как по количеству данных, так и по горизонту анализа, а многоагрегатность алюминиевого производства в данном контексте существенно повысило адекватность анализа, потому как выборка оказалась более чем достаточной. Что такое «технологический сценарий», образно продемонстрировано в таблице 1 — это динамика нескольких технологических параметров эксплуатации электролизера за несколько дней до искомого события — пропуска от выливки металла. В конкретном случае при промышленном анализе в эксперименте использовалось несколько десятков параметров для каждого электролизера и их динамика за 30 суток до события. 30-суточный горизонт планирования был выбран не случайно: именно в 30-

будет выдаваться прогноз для активного взаимодействия с электролизером для недопущения пропуска от выливки — т.е. будет проводиться внеплановая технологическая обработка; по «темной» группе прогноз также будет выдаваться, но в зашифрованном виде. Непосредственный исполнитель будет знать прогноз только для «светлой» группы электролизеров, на которой будет производиться внеплановую технологическую обработку, а по группе электролизеров-свидетелей результат прогнозирования ему известен не будет до окончания эксперимента. Далее, на этапе анализа после извлечения номеров и дат зашифрованных электролизеров, из «темной» группы электролизеров были исключены те электролизеры, на которых была проведена внеплановая технологическая обработка по другим технологическим причинам.

Следует отметить, что определенной проблемой стало психологическое восприятие эксперимента персоналом: во-первых, технологические приемы и практики, которые используются для работы на электролизерах для локализации нарушения, либо малоприменимы для недопущения данного нарушения, либо неприменимы вовсе, а во-вторых, получение задания на проведение технологической операции на электролизере от компьютера, а не от человека, на начальном этапе эксперимента настоятельно требовало технологический персонал.

В целом, технические и психологические проблемы были решены и было проведено накопление определенного технологического опыта выдачи технологических заданий на внеплановую технологическую обработку электролизеров в автоматическом режиме на основе прогнозной аналитики (машинного обучения).

Обсуждение результатов эксперимента

На «темной» группе электролизеров по предсказаниям программы-советчика на основе алгоритма машинного обучения было проведено около тысячи предсказаний снижения производительности электролизера, многие из них оказались корректны — прогноз снижения производительности сбился на 59,5 % предсказаний. Если учитывать, что система была настроена на выдачу не более 4-х предсказаний на корпус (90 электролизеров) в сутки, то 2 точных предсказания на выборку из 90 электролизеров — достаточно высокий результат, сопоставимый в целом с текущим ежесуточным количеством пропускаемых от выливки электролизеров. Этот уровень корректности предсказаний — 59,5 % — стал базовым для дальнейшего анализа.

На «светлой» группе электролизеров после проведения внеплановой технологической обработки доля пропущенных от выливки ванн составила 48,6 %, что позволяет сделать вывод, что проведение внеплановой технологической обработки привело к снижению на $59,5 - 48,6 = 10,9$ % из предсказанных электролизеров, при этом общее количество технологических обработок увеличилось на 6,2 %. Это сопоставимо с увеличением выхода по току примерно на 0,7-1,0 % на корпус электролиза, однако внедряться это может в ограниченном масштабе, потому как влечет за собой рост производственной нагрузки на персонал корпуса электролиза.

Также в процессе эксперимента было определено, что следует разделять понятия «пропуск от выливки металла» и «снижение производительности» во времени, потому как снижение производительности может быть очевидным через несколько дней после начала в момент пропуска от выливки.

Выводы:

1. Существенной проблемой алюминиевого производства являются случаи снижения производительности электролизеров.
2. Существующие классические статистические и/или термодинамические модели на описывают снижение производительности алюминиевых электролизеров с достаточным уровнем достоверности и не могут быть использованы для прогнозирования снижения производительности с целью недопущения такового.
3. Электролизное производство включает в себя тысячи объектов статистического анализа — электролизеров, по каждому из которых десятки параметров эксплуатации отражаются в электронных базах данных. Эти обстоятельства делают электролизное производство алюминиевого завода идеальным объектом для использования методов искусственного интеллекта, в частности, машинного обучения.
4. Развитие искусственного интеллекта и его производных с последующим внедрением в промышленности является одной из приоритетных государственных задач.
5. Использование одного из методов искусственного интеллекта — машинного обучения — на алюминиевом заводе позволило достаточно достоверно прогнозировать снижение производительности алюминиевых электролизеров на горизонте планирования два-три дня.
6. Проведение внеплановой технологической обработки электролизера на основе полученного с помощью метода машинного обучения прогноза позволило не допускать снижения производительности на одном из десяти спрогнозированных электролизеров. Это в целом следует признать положительным результатом: расчетное увеличение производительности электролизера — выхода по току — составило 0,7–1%.
7. Выбранный метод реагирования на прогноз — проведение внеплановой технологической обработки электролизера — достаточно трудоемок для производственного персонала, поэтому ограниченно

применим в действующем производстве. Следует продолжить поиск методов реагирования на прогнозирование снижения производительности алюминиевых электролизеров.

Литература:

1. Ножко С.И., Красноперов А.Н., Сухов О.Ю., Блашков А.А., Пентюхин С.И. Анализ методов оценки выхода по току на электролизерах для производства алюминия/ Цветные металлы. 2011. № 10. С. 75-77.
2. R. Ødegård, Å. Sterten and J. Thonstad, On the solubility of aluminum in cryolitic melts. Metallurgical Transactions B, 19(3), pp. 449-457, 1988.
3. Q. Zhuxian, F. Liman, K. Grjotheim, and H. Kvande, Formation of Metal Fog during Molten salt Electrolysis Observed in a See-Through Cell. J. of App. Electrochem., 17(4), pp. 707-714, 1987.
4. T. Støre, Electrodeposition of Metals from Molten Salts, Ph.D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1999.
5. G. M. Haarberg, K. S Osen, J. Thonstad, R. J Heus and J. J. Egan, Measurement of Electronic Conduction in Cryolite Alumina Melts and Estimation of its Effect on Current Efficiency, Light Metals 1991, pp. 283-281.
6. G. M. Haarberg, K. S Osen, J. Thonstad, R. J Heus and J. J. Egan, Measurement of Electronic Conduction in Cryolite Alumina Melts and Estimation of its Effect on Current Efficiency, Metallurgical Transactions B, 248, pp. 129-135, 1993.
7. G. M. Haarberg, J. Thonstad, J. J. Egan, R. Oblakowski, and S. Pietrzyk, Electrical Conductivity Measurements in Cryolite Alumina Melts in the Presence of Aluminium, Light Metals 1996, pp. 221-225.
8. M. M. Hyland, The Current Efficiency of a Shorted Anode in a Prebake Cell, Journal of Metals, Vol. 35, No. 12, pp. 95-95, 1983.
9. K. Grjotheim, Nature and Origin of Impurities in the Hall-Héroult Electrolyte and Their Effect on Metal Purity, International Seminar on Refining and Alloying of Liquid Aluminium and Ferro-Alloys, 1985.
10. Шахрай С.Г., Дектерев А.А., Скуратов А.П., Минаков А.В., Бажин В.Ю. Повышение энергетической эффективности электролизера с самообжигающимся анодом/ Металлург. 2018. № 9. С. 79-83.
11. B. Lillebuen, S. A. Ytterdahl, R. Huglen, and K. A. Paulsen, Electrochim. Acta 2, 1980, p. 131
12. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Зимина Т.И., Карлина А.И. Моделирование энергетического состояния электролизеров с обожженными анодами при увеличении силы тока/ Металлург. 2017. № 11. С. 27-32.
13. Саитов А.В., Бажин В.Ю., Поваров В.Г. К вопросу использования литиевых добавок в электролитическом производстве алюминия/ Электromеталлургия. 2017. № 7. С. 25-33.
14. Per Arinn Solli, Current Efficiency in Aluminium Electrolysis Cell, DOKTOR INGENIØRAVHANDLING, 1993: 22 Institutt for Teknisk Elektrokjemi, Trondheim
15. Sysoev I.A. Making up model for forced cathode cooling of casing powerful aluminium electrolyzer with prebaked anodes / Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. p. 1271-1276.
16. Sysoev I.A., Kondratev V.V., Sysoeva T.I., Karlina A.I. Simulation of the energy states of electrolyzers with roasted anodes at elevated currents/ Metallurgist. 2018. Т. 61. № 11-12. p. 943-949.
17. Ножко С.И. Планирование и анализ выхода по току на электролизерах для производства алюминия/ Контроль. Диагностика. 2010. № 11. С. 35-39.
18. Nozhko S.I. Method for Determining the Efficiency of an Electrolyzer for Aluminium Production/ Russian metallurgy (Metally). 2011. Т. 2011. № 12. С. 1093-1094.

References in Cyrillics

1. Nozhko S.I., Krasnoperov A.N., Suxov O.Yu., Blashkov A.A., Pentyuxin S.I. Analiz metodov ocenki vy`xoda po toku na e`lektrolizerax dlya proizvodstva alyuminiya/ Czvetny`e metally`. 2011. № 10. S. 75-77.
2. R. Ødegård, Å. Sterten and J. Thonstad, On the solubility of aluminum in cryolitic melts. Metallurgical Transactions B, 19(3), pp. 449-457, 1988.
3. Q. Zhuxian, F. Liman, K. Grjotheim, and H. Kvande, Formation of Metal Fog during Molten salt Electrolysis Observed in a See-Through Cell. J. of App. Electrochem., 17(4), pp. 707-714, 1987.
4. T. Støre, Electrodeposition of Metals from Molten Salts, Ph.D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1999.
5. G. M. Haarberg, K. S Osen, J. Thonstad, R. J Heus and J. J. Egan, Measurement of Electronic Conduction in Cryolite Alumina Melts and Estimation of its Effect on Current Efficiency, Light Metals 1991, pp. 283-281.
6. G. M. Haarberg, K. S Osen, J. Thonstad, R. J Heus and J. J. Egan, Measurement of Electronic Conduction in Cryolite Alumina Melts and Estimation of its Effect on Current Efficiency, Metallurgical Transactions B, 248, pp. 129-135, 1993.

7. G. M. Haarberg, J. Thonstad, J. J. Egan, R. Oblakowski, and S. Pietrzyk, Electrical Conductivity Measurements in Cryolite Alumina Melts in the Presence of Aluminium, *Light Metals* 1996, pp. 221-225.
8. M. M. Hyland, The Current Efficiency of a Shorted Anode in a Prebake Cell, *Journal of Metals*, Vol. 35, No. 12, pp. 95-95, 1983.
9. K. Grjotheim, Nature and Origin of Impurities in the Hall-Héroult Electrolyte and Their Effect on Metal Purity, *International Seminar on Refining and Alloying of Liquid Aluminium and Ferro-Alloys*, 1985.
10. Shaxraj S.G., Dekterev A.A., Skuratov A.P., Minakov A.V., Bazhin V.Yu. Povy'shenie e'nergeticheskoy e'fektivnosti e'lektrolizera s samoobzhigayushhimsya anodom/ *Metallurg*. 2018. № 9. S. 79-83.
11. B. Lillebuen, S. A. Ytterdahl, R. Huglen, and K. A. Paulsen, *Electrochim. Acta* 2, 1980, p. 131
12. Sy'soev I.A., Kondrat'ev V.V., Zimina T.I., Karlina A.I. Modelirovanie e'nergeticheskogo sostoyaniya e'lektrolizerov s obozhzhenny'mi anodami pri uvelichenii sily` toka/ *Metallurg*. 2017. № 11. S. 27-32.
13. Saitov A.V., Bazhin V.Yu., Povarov V.G. K voprosu ispol'zovaniya litiev'x dobavok v e'lektroliticheskom proizvodstve alyuminiya/ *E'lektrometallurgiya*. 2017. № 7. S. 25-33.
14. Per Arinn Solli, Current Efficiency in Aluminium Electrolysis Cell, *DOKTOR INGENIØRAVHANDLING*, 1993: 22 Institutt for Teknisk Elektrokjemi, Trondheim
15. Sysoev I.A. Making up model for forced cathode cooling of casing powerful aluminium electrolyzer with prebaked anodes / *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. p. 1271-1276.
16. Sysoev I.A., Kondratev V.V., Sysoeva T.I., Karlina A.I. Simulation of the energy states of electrolyzers with roasted anodes at elevated currents/ *Metallurgist*. 2018. T. 61. № 11-12. p. 943-949.
17. Nozhko S.I. Planirovanie i analiz vy`xoda po toku na e'lektrolizerax dlya proizvodstva alyuminiya/ *Kontrol'. Diagnostika*. 2010. № 11. S. 35-39.
18. Nozhko S.I. Method for Determining the Efficiency of an Electrolyzer for Aluminium Production/ *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. T. 2011. № 12. S. 1093-1094. *sian metallurgy (Metally)*. 2011. T. 2011. № 12. C. 1093-1094

Ножко Семен Игоревич – менеджер
 ПАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод»,
 665716 г. Братск Иркутской области, Промплощадка БрАЗа,
 кандидат технических наук,
 E-mail: semen.nozhko@rusal.com
 ORCID: 0000-0001-7437-5145,

Зенкин Евгений Юрьевич – Управляющий директор
 ПАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод»,
 665716 г. Братск Иркутской области, Промплощадка БрАЗа

Бондарев Кирилл Александрович – электролизник
 ПАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод»,
 665716 г. Братск Иркутской области, Промплощадка БрАЗа

Соболева Инна Петровна – Руководитель направления
 сектора работы с клиентами АО «Мосэнергосбыт»,
 117420 г. Москва, ул. Наметкина, д. 9 строение 2
 E-mail: isoboleva2017@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-9872-591X

Ключевые слова:

Искусственный интеллект, машинное обучение, алюминиевый завод, выход по току, алюминиевый электролизер, математическое моделирование, большие массивы данных, параметры эксплуатации, технологическая обработка электролизера

Nozhko S.I., Zenkin E. Yu., Bondarev K.A., Soboleva I.P. Machine learning in an aluminum smelter

Keywords

Artificial intelligence, Machine learning, Aluminium plant, Current efficiency, Aluminium reduction cell, Math modelling, Big data, Operating parameters, Technological processing aluminium reduction cell

DOI: 10.34706/DE-2023-02-12

JEL classification L23 – Организация производства; L61 – металлургия, цемент, стекло, керамика

Abstract

The article provides practical experience in implementing machine learning at an aluminum plant. It is shown that an aluminum smelter is an enterprise with a large (more than two thousand identical production facilities – pots) number of objects of analysis, for each of which there are hundreds of different technical parameters of the object's operation, it is difficult to determine the relationship between the operation parameters by classical methods of analysis. These circumstances make aluminum production an ideal candidate for the introduction of artificial intelligence elements in the production process. During the implementation of machine learning at an aluminum plant, the stages of passive and active experiments were carried out, a methodology was developed to determine the effectiveness of the measures taken. The introduction of machine learning methods allows optimizing the labor costs of the main technological personnel, while increasing production efficiency.