

УДК 621.311.001.57

В.П. ЩЁКИН (д-р техн. наук, проф.)
Государственное высшее учебное заведение
«Криворожский национальный университет»
shchokin@rambler.ru

АДАПТИВНАЯ АВТОРЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ РУДОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК ГОРНО- ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

Приведена методика синтеза нейросетевой авторегрессионной модели электропотребления фабрик горно-обогатительных производств. На основе результатов промышленных испытаний, доказана эффективность применения данной модели в информационной системе оперативного внутрисуточного и внутрисуточного прогноза активной нагрузки горно-обогатительных предприятий.

Ключевые слова: внутрисуточный и внутрисуточный прогноз, информационные технологии, нейронные сети, оптимизация режимов электропотребления, ограничение нагрузок потребителей, горно-обогатительное предприятие.

Постановка проблемы. Большая часть основного оборудования горно-обогатительных комбинатов Украины отработала установленный стандартами срок службы: 80% оборудования - свой проектный ресурс, 52% – превысило предельный. Это привело к повышению удельной энергоёмкости производства, которая составляет 18% от общей себестоимости, вместе с тем качество продукции отечественных горно-обогатительных комбинатов в среднем на 1-3% меньше, чем у зарубежных конкурентов.

В современном производстве замена около 50% оборудования на новое в короткие сроки невозможна, вместе с тем замена в широких масштабах оборудования горно-обогатительных предприятий не всегда является экономически и практически целесообразной. В соответствии с вышеизложенным, важнейшая проблема современных горнодобывающих и обогатительных производств на ближайшие 15-20 лет заключается в увеличении сроков, определенных стандартами и другими нормативными документами, надежной и эффективной эксплуатации основного технологического оборудования. Соответственно, научные работы связанные с реализацией системных мероприятий направленных на энергосбережение являются стратегическими и актуальными для горно-металлургической отрасли Украины.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Проблемами статистического анализа электропотребления элементами техноценозов и построения эмпирических моделей процессов электропотребления посвящено значительное количество научных работ Б.И. Кудрина, В.В. Фуфаева, В.И. Гнатюка [1] и др. В вышеупомянутых работах предложены методы нормирования электропотребления и разработаны методики определения графиков проведения планово-предупредительных ремонтов на объектах техноценозов. К основным особенностям предложенных методик можно отнести: очередность и периодичность ремонтов определяется целевым назначением оборудования, его конструктивными и ремонтными особенностями, а также условиями эксплуатации; планово-предупредительный ремонт (ППР) оборудования предусматривает выполнение: межремонтного обслуживания; периодических аудитов; периодических плановых ремонтов - малых, средних, капитальных; ППР осуществляются по плану-графику, разрабатываемому по нормативам ППР; категорий ремонтной сложности, трудоемкости и материалоёмкости.

Наиболее близким решением, выбранным в качестве прототипа, является методика оптимального управления энергопотреблением на системном уровне [1]. Способ включает использование усредненного объединения одномерных данных, в котором на каждом этапе применяется оценка расстояний между статистическими данными, определение пары ближайших данных и замены их средним значением, получение единственного кластера, создание многоуровневой иерархии, группирование объектов, проведение нормирования электропотребления и определение очередности объектов, для энергетического аудита.

Формулирование целей статьи. Описанный метод статистического планирования энергетических аудитов [1] имеет ряд недостатков: синтез эмпирической модели процесса электропотребления проводится на основе классической теории статистической обработки данных, которая содержит в себе интервальное оценивание, а также ранговый и кластерный анализ, погрешность методов при этом достигает 15%; прогнозирование электропотребления отдельными объектами и инфраструктурой в целом осуществляется на базе рангового анализа, при этом точность прогнозирования может быть повышена за счет использования известных парадигм нейронных сетей; кластерный анализ позволяет разделить объекты по группам, однако количество кластеров задается априорно, что значительно снижает точность нормирования электропотребления объектами в каждой группе; статистический анализ осуществляется при использовании только данных по активной мощности.

Целью данной статьи является популяризация результатов усовершенствования базовой методики [1] за счет использования разработанной ARMABIS-модели оперативного прогноза активной нагрузки, что позволяет

© Щёкин В.П., 2013

уменьшить погрешность прогноза и повысить эффективность применения информационной системы оптимизации режимов электропотребления и ограничения нагрузок потребителей фабрик.

Постановка проблемы. Модели дискретных стохастических процессов принято [2] описывать в виде фильтра с неизвестной передаточной функцией (ПФ) $H(z)$. Обычно полагают, что возмущающий сигнал является белым шумом $e(n)$, а ПФ имеет вид:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_q z^{-q}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p}}. \quad (1)$$

Прогнозирующие модели позволяют экстраполировать значение процесса с учетом известной ретроспективы. В случае динамической экстраполяции электрических нагрузок предприятия, на каждом шаге прогноза необходимо корректировать весовые коэффициенты моделей, количество которых зависит от порядка дифференциальных уравнений описывающих объект (для ARIMA-модели порядок определен значениями p, d, q). В случае отсутствия математической модели объекта, вопрос количества настраиваемых параметров решается в процессе моделирования с помощью соответствующей оценки ошибки прогноза, что приводит к обязательному решению сопутствующей задачи - многопараметрической оптимизации параметров модели непосредственно в процессе эмуляции.

Во временной области связь входного $u(n)$ и выходного $y(n)$ сигналов модели дискретных стохастических процессов (фильтров) с передаточной функцией (1) описывают [2] в виде разностного уравнения:

$$y(t) = \sum_{l=0}^q \beta_l \zeta(t-l) - \sum_{k=1}^p \alpha_k y(t-k), \quad (2)$$

где $\zeta(\cdot)$ - независимая переменная.

Разностное уравнение (2) характеризует авторегрессионные процессы $\sum_{k=1}^p \alpha_k y(t-k)$ (AR(p)-модель с распределенным лагом зависимой переменной) со скользящим средним $\sum_{l=0}^q \beta_l \zeta(t-l)$ (MA(q)-модель с распределенным лагом независимой переменной), или ARMA-процессы (AutoRegressive with Moving Average).

Запишем дискретную ARMA-модель с распределенным лагом порядка (0,q) (MA(q)) для эталонного значения выходной координаты объекта (активной нагрузки):

$$y^*[i] = \alpha + \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + \varepsilon[i]. \quad (3)$$

Определим конечную разность порядка m в следующем виде:

$$\Delta^m y[i] = \mu(1-B)^m = \mu(\Delta^{m-1} y^*[i] - \Delta^{m-1} y^*[i-1]), \quad i = 0 \dots n-m, \quad (4)$$

где μ - коэффициент регуляризации ADL-структуры.

Исключив из (4) эталонную величину $y^*[i]$, получим дискретную адаптивную структуру моделей ADL (p,q), которые характеризуют адаптивные ARMA-процессы:

$$y[i] = \mu \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + (1-\mu) \cdot \left(\left[\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} \cdot p \cdot y[i-j] \right] + (-1)^{p+1} \cdot y[i-p] \right) + \mu \varepsilon[i]. \quad (5)$$

С целью придания адаптивных свойств ADL-моделям разработан [3] алгоритм адаптации весовых коэффициентов $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ на базе модифицированного градиентного метода минимизации квадратичного функционала $J(\varepsilon_u) = 0,5 \varepsilon_u^T \varepsilon_u$.

Если представить решение неоднородного разностного уравнения в виде суммы переходной и вынужденной составляющей, условие затухания свободного движения системы (условие устойчивости) имеет вид [2]:

$$|\lambda_v| < 1 \quad (v = 1, 2, \dots, n). \quad (6)$$

Таким образом, разработанная модель (5) со структурой ADL(p,q) обладает адаптивными свойствами за счет настройки весовых коэффициентов регрессионного лага на базе модифицированного градиентного метода минимизации квадратичного функционала, а условие устойчивости обеспечивается настройкой весовых коэффициентов критериального лага в соответствии с условием (6). Подобные дискретные адаптивные структуры, которые ориентированы на эмуляцию адаптивных ARMA-процессов, сокращенно предложено [3] называть ARMABiS (AutoRegressive with Moving Average Brain-inspired Systems).

С целью тестовой оценки эффективности работы разработанной системы нейросетевого прогноза электропотребления рудообогатительных фабрик ГОКов для первичной настройки системы использованы входные данные пример которых приведен в табл.1.

Таблица 1 – Пример основных используемых показателей работы РОФ-1

Наименование показателя	Ед. изм.	1	2	3	4
Добыча руды	тыс. т.	1720,0	1686	1880	1860
Содержание Fe общ.	%	34,83	34,87	34,85	34,81
Содержание Fe маг.	%	27,6	27,63	27,57	27,54
Влага в руде	%	1,0	1,0	1,0	1,0
Ср. мелкое дробление, цех №1	тыс. т.	1720	1686	1880	1860
2-3 поток	тыс. т.	860,0	843	940	930
Класс +20 мм	%	13,53	13,52	13,52	13,52
3/4 стадия	Тыс. т	860,0	843	940	930
Класс +20 мм	%	13,70	13,73	13,73	13,69

В качестве эталонного выходного значения принято фактическое электропотребление РОФ-1 (тыс. кВт•ч).

Обучение ARMABiS-модели осуществляется итерационным методом путем последовательного предъявления входных векторов (табл. 1) с одновременной адаптацией весовых коэффициентов нейросети.

Прогнозируемое и фактическое значение электропотребления РОФ-1 ОАО «ЮГОК» приведено на рис.1. Отдельный график характеризует изменение относительной ошибки прогноза.

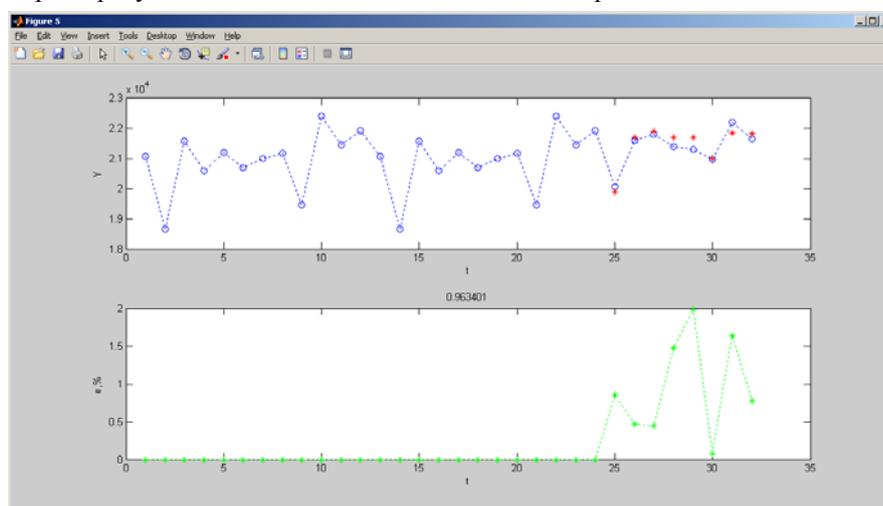


Рисунок 1 – Результаты работы ARMABiS-модели электропотребления РОФ-1 ОАО «ЮГОК»

Промышленные испытания ARMABiS-модели электропотребления рудообогатительных фабрик ОАО «ЮГОК» подтверждают эффективность использования подобных моделей для двух видов оперативного прогноза нагрузки: первый – с интервалом упреждения от нескольких часов до суток и дискретностью 1 раз в час; второй – с интервалом упреждения 1-1,5ч. С дискретностью 5-15мин. При этом MAPE-ошибка моделей, в режиме рабочего функционирования, не превышает 1,5%.

Выводы. Разработанная методика синтеза ARMABi-системы оперативного прогноза активной нагрузки горно-обогатительных предприятий позволяет значительно (до 15%) снизить погрешность прогноза, и соответственно может быть эффективно использована для внутрисуточного прогноза, который используется для оценки и корректировки баланса активной мощности предприятия на несколько часов вперед, в том числе и для планирования ограничения нагрузки потребителей комбината. А также, эффективность использования доказана при внутрисуточных прогнозах, которые применяются в качестве исходных данных для многих аналитических задач оперативного управления, в том числе для внутрисуточной оптимизации режима по активной мощности, внутрисуточной оценки надежности режима и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Ценологические исследования / В.И. Гнатюк.; Центр системных исследований. - 2005. – Выпуск 29.
2. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. - М.: Главная редакция физико-математической литературы. «Наука», 1977.
3. Щокін В.П. Адаптивне керування агломераційним комплексом на основі авторегресійних структур з регуляризациєю: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / Вадим Петрович Щокін; ДВНЗ «Криворізький національний університет». - Кривий Ріг, 2012. – 40с.

REFERENCES:

1. Hnatiuk V. Law technocenoses optimal construction. – Issue 29. Tsenologicheskie study. – Moscow: Publishing House of the Tbilisi State University – Center for Systems Research, 2005.
2. Zipkin J. The theory of automatic systems. – M.: Home Edition physical and mathematical literature. "Science," 1977.
3. Shchokin V. P. Adaptive control agglomeration complex on the basis of autoregressive structures with regulation. – Manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.07 - automation of control processes. – Krivoy Rog national university, Krivoy Rog, 2012.

Надійшла до редакції 18.03.2013

Рецензент: О.П. Ковальов

В.П. ЩОКІН

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»

Адаптивна авторегресійна модель електроспоживання рудозбагачувальних фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів. Наведена методика синтезу нейромережевої авторегресійної моделі електроспоживання фабрик гірничо-збагачувальних виробництв. На основі результатів промислових випробувань, доведена ефективність застосування даної моделі в інформаційній системі оперативного внутрішньодобового і внутрішньогодинного прогнозу активного навантаження гірничо-збагачувальних підприємств.

Ключові слова: внутрішньодобовий та внутрішньогодинний прогноз, інформаційні технології, нейронні мережі, оптимізація режимів електроспоживання, обмеження навантажень споживачів, гірничо-збагачувальне підприємство.

V. SHCHOKIN

State Institution of Higher Education "Kryvyi Rih National University"

Adaptive Autoregressive Model of Power Consumption in Ore-Dressing Plants of Mining Factories. The most important problem of modern mining and processing industry for the next 15-20 years is to increase the time limits specified standards and other regulations, reliable operation of the main technological equipment. Accordingly, studies related to the implementation of the system of measures aimed at energy conservation are strategic and relevant to the mining industry of Ukraine. The purpose of this article is to promote the improvement of the results of the basic techniques of optimal power management at the system level [1].

Key words: in hour forecasts, information technologies, neural networks, optimization of the modes of electro-consumption, limitation of loadings of users, ore mining and processing enterprise.