ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):34-45
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313: 631.371 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПУТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Г.И. Бабокин[1], Д.М. Шпрехер[2], Е.Б. Колесников[3]

[1] ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия
[2] ТулГУ, Тула, Россия, e-mail: shpreher-d@yandex.ru
[3] НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, Россия

Аннотация: Предложен метод повышения безопасной и эффективной эксплуатации горного электрооборудования. Его использование в системе контроля и прогнозирования сопротивления изоляции электрооборудования позволит оценивать с достаточной точностью на заданный период достижение сопротивлением изоляции критического значения и тем самым предвидеть момент возникновения отказа. Решить эту задачу предложено с применением цифровых технологий на базе искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей. Показан нейросетевой алгоритм реализации предложенного метода на базе нейронной сети прямого распространения. Представлены результаты прогнозирования сопротивления изоляции. Анализ полученных графиков говорит о приемлемости полученного результата, точность прогнозирования составляет 95%. Внедрение предлагаемого метода контроля и прогнозирования сопротивления изоляции позволит повысить электробезопасность эксплуатации горного оборудования за счет исключения поражения электрическим током персонала в случаях необеспечения предусмотренного регламентом времени срабатывания аппарата защиты от утечек. В то же время, данный метод позволит повысить эффективность функционирования горного оборудования за счет сокращения ущерба от внезапных отключений подземных горных машин в процессе их нормальной работы.

Ключевые слова: горные машины, электробезопасность, сопротивление изоляции, надежность, отказ, аппаратура защиты, прогноз, нейронная сеть.

Для цитирования: *Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б.* Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 34–45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.

Method of improving safe operation of mining machinery electrics by forecasting insulation resistance

G.I. Babokin[1], D.M. Shprekher[2], E.B. Kolesnikov[3]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia
[2] Tula State University, Tula, Russia, e-mail: shpreher-d@yandex.ru
[3] Novomoskovsk Institute (branch) of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russia

© Г.И. Бабокин, Д.М. Шпрехер, Е.Б. Колесников. 2020.

Abstract: The method is proposed to increase safe and efficient operation of mining machinery electrics. The use of this method in control and forecasting of electrics insulation resistance allows sufficiently accurate estimate of critical insulation resistance for a preset time period and, thus, provides failure prediction. It is proposed to solve this problem using digital technologies based on the artificial intelligence, in particular, neural networks. The implementation algorithm is based on the direct distribution neural network. The results of the insulation resistance forecasting are presented. The analysis of the obtained diagrams suggests acceptability of the results: the forecasting accuracy makes 95 %. The introduction of the proposed insulation resistance forecasting and control method will enhance electrical safety of mining equipment handling due to elimination of electric traumas of personnel in case of the current leakage protection malfunction. At the same time, this method can enhance efficiency of mining equipment through the reduced damage because of sudden outages of normally running mining machinery.

Key words: mining machines, electrical safety, insulation resistance, reliability, failure, protection equipment, prediction, neural network.

For citation: Babokin G. I., Shprekher D. M., Kolesnikov E. B. Method of improving safe operation of mining machinery electrics by forecasting insulation resistance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(2):34-45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации электрооборудования в сетях с изолированной нейтралью при подземной добыче полезных ископаемых угольных шахт, рудников и т.д. достигается с помощью аппаратов защиты от токов утечки [1]. Аппараты (реле) защиты от утечки контролируют сопротивление изоляции шахтных электрических сетей и инициируют достаточно быстрое отключение электроприемников или части сети от источника напряжения при прикосновении человека к одной фазе, элементу электросети или корпусу электроустановки, оказавшемуся под напряжением вследствие механического повреждения или снижения уровня сопротивления изоляции ниже критического (заданного) значения [2, 3].

К основным элементам шахтной поземной электрической сети относятся трансформаторы, коммутационная аппаратура, кабели и электродвигатели. Величина сопротивления изоляции элементов электрической сети меняется в процессе эксплуатации в зависимости от режимов работы механизмов (вибрации, нагрузки), параметров окружающей среды (температуры, влажности, агрессивных паров, угольной пыли) [3]. Приближение величины сопротивления изоляции к значению, заданному по условию безопасности обслуживающего персонала, происходит с различной скоростью, и при быстром изменении сопротивления изоляции срабатывание защитного аппарата может происходить с запаздыванием и выйти за пределы, предусмотренные регламентом. В этом случае прикосновение человека к элементу, оказавшемуся под напряжением, приводит к повышенной для него опасности [4].

Быстрое или внезапное снижение сопротивления изоляции имеет место при частичном затоплении оборудования, длительном простое оборудования или термической деградации изоляции. В нормальных условиях и режимах работы оборудования сопротивление изоляции падает с низкой скоростью, и периодические плановые замеры сопротивления могут предупредить возможность наступления срабатывания аппарата защиты от течки и выбрать целесообразную форму управляющего действия на элект-

рооборудование [5, 6]. При достижении сопротивления изоляции критического уровня защита отключает оборудование от сети. В этом случае оборудование, например очистной комбайн и механизированный комплекс, простаивает на период восстановления сопротивления изоляции, поврежденных элементов электрической сети. Предприятие имеет потери добычи полезного ископаемого и экономический ущерб, который определяется временем простоя, стоимостью добытого полезного ископаемого и т.д. [7].

Повысить безопасность работ и эффективность функционирования горного оборудования возможно применением системы контроля и прогнозирования сопротивления изоляции. Это позволит своевременно выявить участок сети, на котором наметилась тенденция повреждения изоляции, и восстановить сопротивление изоляции сети в период планового ремонта, до возникновения аварийной ситуации, что обеспечит уменьшение вероятности возникновения электроопасной ситуации и снизит ущерб от потери добычи [8, 9].

Решить задачу своевременного выявления дефектов изоляции позволит непрерывное диагностирование состояния электрооборудования интеллектуальными узлами для прогнозирования ее изменения [10].

Анализ исследований и публикаций

В настоящее время применяются методы диагностирования на отключенном электрооборудовании, при этом применяют специальные схемы для измерений сопротивления изоляции $R_{из}$, и благодаря этому такие методы имеют достаточно высокую точность определения места дефекта. Но данные методы требуют остановки электрооборудования и приводят к потере производительности технологической линии. В [11] показано, что если удается определить не только место, но и величину сопротивления изоляции в месте дефекта, то можно прогнозировать предельно допустимое время работы электрооборудования с таким дефектом.

В существующих устройствах, измеряющих сопротивление изоляции в подземных электрических сетях (аппараты утечки), реализуется общий допусковый принцип текущего контроля, когда обнаружение дефекта производится по результатам сравнения измеренного параметра с допустимым значением, и в случае снижения уровня сопротивления изоляции элементов электрооборудования, происходит его обесточивание для последующего устранения причин.

В [10, 12] установлено, что необходимо периодически производить контроль параметров изоляции, так как именно ухудшение изоляции электрической сети чаще всего приводит к поражению рабочего персонала электрическим током, возникновению пожара, повреждению электрооборудования.

Вопросам решения задачи контроля и прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса оборудования посвящен ряд зарубежных работ, где доказывается принципиальная возможность ее решения, и в частности с помощью нейронных сетей [13—15].

Цель работы

Обоснование структуры, параметров нейронной сети для прогнозирования сопротивления изоляции электрооборудования с учетом воздействия внешних факторов, разработка алгоритма ее функционирования и оценка точности прогнозирования.

Методика и результаты исследования

В работе решается задача контроля и прогнозирования сопротивления изоляции оборудования $R_{из}$, которое опре-

деляется в современных устройствах защитного отключения по измеренным значениям оперативного тока и напряжения источника [16—18].

Прогнозирование изменения сопротивления изоляции имеет цель предсказать в будущем с определенной вероятностью момент возникновения отказа. Таким образом, задача прогнозирования изменения сопротивления изоляции сводится к предсказанию одного из количественных показателей надежности изоляции электрооборудования.

В теории надежности известно большое число методов прогнозирования технического состояния различных изделий и систем. Существующие математические модели прогнозирования, когда результатом интерполирования является какое-либо аналитическое выражение, представляющее собой определенную функциональную зависимость, составляются на основании статистического анализа, к примеру, для конкретного участка «сеть — электрооборудование» и конкретных условий его эксплуатации, и поэтому не имеют достаточной общности и точности [19]. Кроме того, применение статистических методов и элементов теории надежности к оценке изменения сопротивления изоляции оборудования в эксплуатации в настоящее время затруднительно в силу большого числа влияющих факторов, а также небольшой достоверности данных по вероятностям выхода оборудования из строя в зависимости от времени его работы [20].

Прогнозирование отказов изоляции возможно при выполнении следующего: на основе статистических данных изучен процесс изменения сопротивления изоляции во времени; выбраны средние сроки службы изоляции при эксплуатации; выбран или разработан аппарат прогнозирования.

Прогнозирование сопротивления изоляции оборудования в работе предлагается решать с применением цифровых технологий на базе применения искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей [21, 22].

Диагностическим параметром принято значение омического сопротивления изоляции электрооборудования горных машин.

В процессе функционирования НС формирует выходной сигнал Y в соответствии с входным сигналом X, реализуя некоторую функцию g: $Y = g(X)$. Если архитектура сети задана, то вид функции g определяется значениями синаптических весов и смещений сети. Обозначим буквой G множество всех возможных функций g, соответствующих заданной архитектуре сети. Тогда поставленная задача прогнозирования решается следующим образом. Пусть есть функция r: $Y = r(X)$, заданная парами входных-выходных данных (X_1,Y_1), ... , (X_k,Y_k) для которых $Y_i = r(X_i)$, $i \equiv 1,k$. E — функция ошибки (функционал качества), показывающая для каждой из функции g степень близости к r.

$$E(g) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}[g(X_i) - r(X_i)]^2}{k}},$$

где k — число примеров в обучающем множестве; $g(X_i)$ — выход НС для i-го входного образа; $r(X_i)$ — эталонное значение для i-го входного образа.

Решить поставленную задачу с помощью НС заданной архитектуры — это значит построить (синтезировать) функцию $g \subset G$, подобрав параметры нейронов (синаптические веса) таким образом, чтобы функционал качества обращался в минимум для всех пар $(X_k,Y_k) \rightarrow \min_{g \in G}(E(g))$.

Таким образом, задача обучения НС определяется совокупностью пяти компонентов: $<X, Y, r, G, E>$, где X — входной сигнал; Y — выходной сигнал, r: $X \rightarrow Y$ определяет желаемый результат обучения (определяется обучающей выбор-

кой); G — множество функций g: $X \to Y$ (это множество определяется архитектурой сети); $E(g)$ — функционал ошибки, показывающий для каждой из функции g степень близости к r [23].

Обучение состоит в поиске (синтезе) функции g, оптимальной по E. Оно требует длительных вычислений и представляет собой итерационную процедуру. Число итераций может составлять от 10^3 до 10^8. На каждой итерации происходит уменьшение функции ошибки.

Для решения поставленной задачи с помощью ИНС необходимо выполнить ряд следующих этапов.

1. На первом этапе формируется обучающая выборка исходных данных. Под обучающей выборкой понимается набор данных, состоящий из входных параметров и соответствующего им известного значения прогнозируемого параметра. Для чего необходимо получить статистические данные измерений значения функции $R_{из}(t_0)$, $R_{из}(t_1)$, $R_{из}(t_2)$,..., $R_{из}(t_п)$ от момента начала регистрации значений сопротивления изоляции (t_0) до момента регистрации последнего известного значения сопротивления изоляции ($t_п$) [24, 25].

Для учета внешних факторов, влияющих дополнительно на изменение сопротивления изоляции, предлагается дополнительно добавить статистику данных относительной влажности φ % и температуры t °С наружного воздуха.

Далее совокупность входных данных следует разделить на обучающую, тестовую и контрольную выборки в процентном соотношении 70/15/15.

2. На втором этапе выбирается тип и архитектура ИНС, предназначенной для решения задачи прогнозирования. В качестве структуры прогнозной модели НС выбираем сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями, нелинейной сигмоидальной функцией активации. Выбор двухслойной нейронной сети обусловлен необходимостью преодоления проблемы «разделимости» [26]. Выбор функции активации продиктован многослойной структурой нейронной сети и сложившейся практикой реализации такого рода сетей [27].

Входной обучающий сигнал НС состоит из трех составляющих: фактического значения сопротивления изоляции, температуры окружающей среды, влажности воздуха, выходной параметр — прогнозируемое значение сопротивления изоляции электрооборудования (рис. 1).

Нейроны входного слоя выполняют только распределительные функции для входных сигналов. Размерность входного слоя равна произведению количества контролируемых параметров ЭМС, умноженному на число отсчетов в течение периода основания прогноза. Размерность выходного слоя сети принимают равной числу параметров ЭМС, значения которых надо прогнозировать. Поэтому принимаем, что выходной слой будет представлен одним нейроном, т.к. надо спрогнозировать только один параметр — сопротивление изоляции [24, 28].

Рис. 1. Структурная схема модели НС для прогнозирования изменения сопротивления изоляции
Fig. 1. Architecture of neural network of forecasting changes in insulation resistance

Количество нейронов в скрытых слоях определяется экспериментально. Предварительно число нейронов в скрытых слоях можно выбрать, воспользовавшись формулой для оценки необходимого числа синаптических весов N_w в многослойной сети с сигмоидальными передаточными функциями [29]:

$$\frac{N_y N_p}{1+\log_2(N_p)} \le N_w \le N_y\left(\frac{N_p}{N_x}+1\right)(N_x+N_y+1)+N_y,$$

где N_y — размерность выходного сигнала; N_p — число элементов обучающей выборки; N_x — размерность входного сигнала.

Оценив необходимое число весов, можно рассчитать число нейронов в срытых слоях. Например, число нейронов скрытого слоя в двухслойной сети составит $N = N_w/(N_x + N_y)$ [30].

3. На третьем этапе производится предварительная обработка входных данных, заключающаяся в нормировании, т.е. преобразовании входных данных к диапазону, соответствующему выходным значениям активационной функции нейронов ИНС. Нормирование осуществляется по известным формулам [31].

4. Этап выбора алгоритма обучения ИНС. Он представляет собой стандартный алгоритм обратного распространения, адаптированный к задаче прогнозирования.

Обучение методом обратного распространения ошибки предполагает два прохода по всем слоям сети: прямой и обратный. Принцип функционирования алгоритма обратного распространения ошибки заключается в использовании метода градиентного спуска и корректировки весов для минимизации ошибки нейронной сети [21]. Множество весовых коэффициентов инициализируется произвольными значениями в диапазоне от 0 до 1. Формула коррекции весов для выходного слоя имеет следующий вид [24]:

$$w_{p,k}(i+1) = w_{p,k}(i) + \eta\delta_k OUT_p,$$

где i — номер итерации обучения; $w_{p,k}$ — синаптический вес, соединяющий нейрон p скрытого слоя с нейроном k выходного слоя; $\delta_k = OUT_k(1 - OUT_k)(T_k - OUT_k)$; η — коэффициент скорости обучения; OUT_p — выход нейрона; T_k — целевое значение выхода нейрона.

Каждый нейрон сети имеет нелинейную функцию активации:

$$OUT_k = \frac{1}{1+\exp\left(-\sum_{k=1}^{L} x_k \cdot w_k\right)},$$

где x — входы нейрона; L — количество входов; w_k — синаптические веса входов.

Рис. 2. Параметры нейросетевого прогнозирующего классификатора

Fig. 2. Parameters neural network forecasting classifier

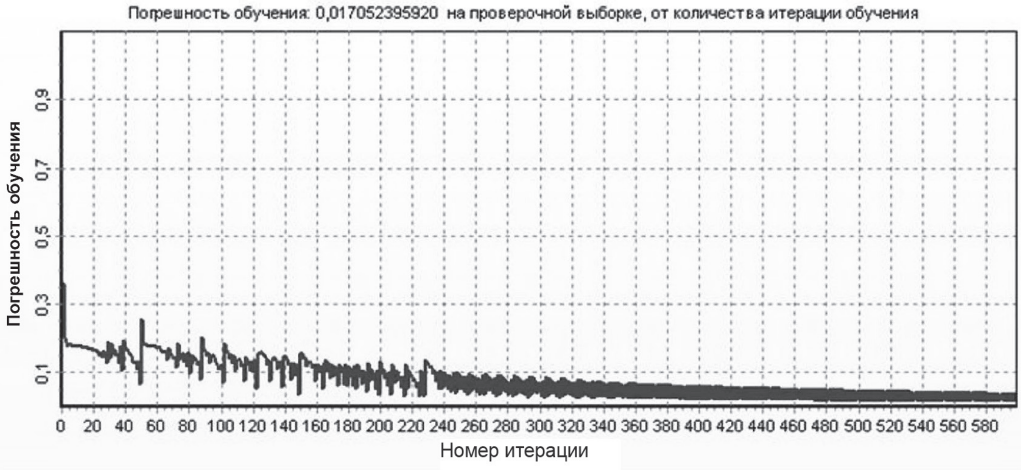

Рис. 3. Результат изменения ошибки нейронной сети в процессе ее обучения
Fig. 3. Result of change of neural network error during learning

Формула для коррекции весов скрытого слоя имеет вид

$$w_{p,q}(i+1) = w_{p,q}(i) + \eta\delta_q OUT_p$$

где синаптический вес, соединяющий нейрон *p* предыдущего слоя с нейроном *q* скрытого слоя,

$$\delta_q = OUT_q\left(1 - OUT_q\right)\sum_{i=1}^{N}\delta_k w_{q,k} ,$$

N — количество нейронов следующего слоя.

Исходный массив экспериментальных данных в виде файла MS Excel (*.xls) загружался в программный модуль специального программного обеспечения «ЭМС-НС» [32].

Затем происходила загрузка модели нейросетевого многослойного классификатора. Выставлялись параметры классификатора: архитектура и структура НС, алгоритм обучения, функции активации нейронов, период основания прогноза и число прогнозируемых точек (рис. 2).

Затем активировался процесс обучения прогнозирующей НС с определенным числом итераций обучения и скорости обучения для минимизации ошибки погрешности аппроксимации и достижения требуемой точности прогноза.

На рис. 3 представлен график сходимости НС прогнозирующего классификатора к заданной погрешности распознавания.

На рис. 4 результаты его проверки на тестовой выборке. Анализ полученных

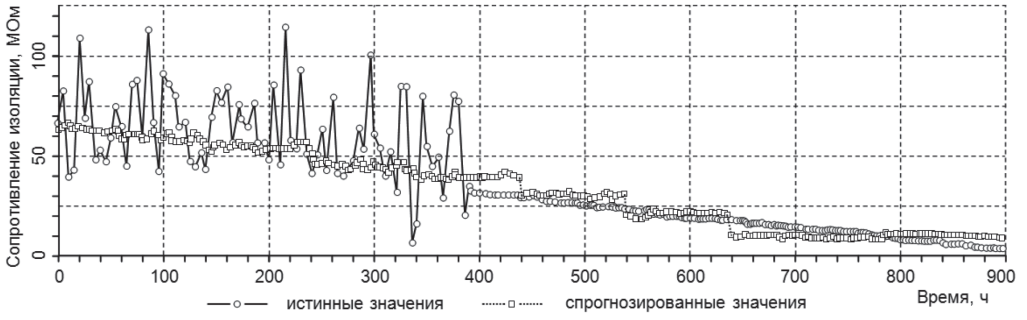

Рис. 4. Результат прогнозирования изменения сопротивления изоляции
Fig. 4. Result of insulation resistance change forecast

графиков говорит о приемлемости полученного результата, точность прогнозирования составляет 95%.

Таким образом, предлагаемое прогнозирование позволит установить предельное значение сопротивления изоляции $R_{кр}$, при котором электрооборудование должно быть выведено из эксплуатации. Зная эту величину, можно определить вероятность наступления аварийного состояния изоляции и время проведения технического обслуживания с заменой или ремонтом.

Заключение

1. Разработан метод контроля и прогнозирования сопротивления изоляции подземных сетей и электрооборудования горных машин с применением цифровых технологий на базе искусственных нейронных сетей, позволяющий по фактической тенденции изменения сопротивления оценивать с достаточной точностью на заданный период достижение сопротивлением изоляции критического значения.

2. Применение метода контроля и прогнозирования сопротивления изоляции позволяет улучшить электробезопасность эксплуатации горного оборудования за счет исключения поражения персонала электрическим током в случае необеспечения предусмотренного регламентом времени срабатывания аппаратом защиты от утечек, а также повысить эффективность функционирования горного оборудования за счет сокращения ущерба от внезапных отключений подземных горных машин в процессе их нормальной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pasculescu D., Lupu L., Pasculescu V. M., Inisconi I.* Study of electrocution hazards in three-phase electrical networks with ground-isolated neutral point // Environmental Engineering and Management Journal. 2012. Vol. 11(7), pp. 1267—1271. DOI: 10.30638/eemj.2012.154.

2. *Utegulov B.* Special issues of ensuring electrical safety in networks with isolated neutral voltage up to 1000 V at mining enterprises / Industrial Engineering. 2018, pp. 1—29. DOI: 10.5772/intechopen.81384.

3. *Вареник Е.А., Лазебник Р.М.* Повышение эффективности функционирования аппаратов защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2011. — № 11(186). — С. 81—84.

4. *Neitzel D.K.* Protection against hazards // IEEE Industry Applications Magazine. 2010. Vol. 16(3), pp. 23—29. DOI: 10.1109/MIAS.2010.936121.

5. *Megger* «A Stitch in Time...» (The Complete Guide to Electrical Insulation Testing). 2006, p. 67.

6. *IEEE Recommended* practice for testing insulation resistance of rotating machinery. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, 2008, pp. 1—26.

7. *Лангольф Э.Л., Вылегжанин В.Н., Мазикин В.П.* Проблемы эффективности реструктуризации угольной промышленности Кузбасса. — Кемерово: Кузбассвузиздат, 1997. — 248 с.

8. *Гребченко Н.В., Сидоренко А.А.* Интеллектуальная система для определения места и степени локальных дефектов изоляции в сети с изолированной нейтралью / Релейная защита и автоматика энергосистем. Сборник докладов. — 2006. — С. 150—152.

9. *Лапченков К.В.* Управление состоянием изоляции в распределительных электрических сетях. Дис. на соиск. ученой степени к.т.н.: Челябинск, 1998. — 119 с.

10. *Булычев А.В., Нудельман Г.С.* Упреждающие функции релейной защиты / Сборник докладов международной НТК «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». — М., 2009. — С. 72—78.

11. *Утегулов Б.Б., Утегулов А.Б., Уахитова А.Б., Бегентаев Б.М.* Разработка мероприятий по повышению уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В шахты «Капитальная» АО «Майкаинзолото» // Наука и техника Казахстана. — 2010. — № 3. — С. 130—136.

12. *Wang Xiu Yan, Li Cui Fang, Li Zong Shuai, Lin Jia Quan* Research of airfield lighting insulation resistance prediction based on gray system theory // Applied Mechanics and Mate-

rials. 2012. — Vol. 263—266, pp. 1279—1284. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.263-266.1279.

13. *Remus Dobra, Mircea Risteiu, Dragos Pasculescu, Georgeta Buica* Designing predictive diagnose method for insulation resistance degradation of the electrical power cables from neutral insulated power networks. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 209. International Conference on Innovative Research — ICIR Euroinvent 2017, Article 012093. DOI: 10.1088/1757-899X/209/1/012093.

14. *Yusuf S., Brown D.J., Mackinnon A., Papanicolaou R.* Application of dynamic neural networks with exogenous input to industrial conditional monitoring / The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2013. DOI: 10.1109/IJCNN.2013.6706762.

15. *Yongmei Zhao, Junfeng Li, Lingjie Wu, Yanwen Wang* High-voltage cable insulation online monitoring in coal mine based on pattern recognition // AIP Confference Proceedings. 2017. Vol. 1820 Advances in Materials, Machinery, Electronics I, pp. 060015–1—060015–6. DOI: 10.1063/1.4977330.

16. *Товстик Ю.В.*, *Савицкий В.Н.*, *Стоян В.Н.* Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, с силовыми полупроводниковыми элементами / Гірнича електротехніка та автоматика: Наук. техн. зб. НГУ. Вип. 74. — Дніпропетровськ, 2005. — С. 36—42.

17. *Jie Wen, Tiejun Zeng, Feng Yan, Wenguang Chen* Research on ON-LINE insulation monitoring instrument of IT power system in the down hole mine / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 394, Article 042081. 2018, pp. 1—11. DOI: 10.1088/1757-899X/394/4/042081.

18. *Dandan Su* Analysis of low voltage cable insulation detection technology // Advances in Engineering Research (AER). 2017. Vol. 130 5th International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology (FMSMT 2017), pp. 211—214. DOI: 10.2991/fmsmt-17.2017.44.

19. *Захарова А.Г.*, *Лобур И.А.*, *Шаулева Н.М. и др.* Обследование состояния взрывозащищенного электрооборудования на крупных предприятиях // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2015. — № 2. — С. 44—48.

20. *Митькин Ю.А.*, *Вихарев А.В.*, *Прусаков М.В.* Проблемы оценки технического состояния маслосодержащей изоляции высоковольтного оборудования в эксплуатации // Вестник ИГЭУ им. В.И. Ленина. — 2006. — № 2. — С. 1—5.

21. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс 2-е изд. Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.

22. *Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic* A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, pp. 1483—1510.

23. *Родионов П.Е.* Классификация существующих парадигм нейронных сетей / Материалы 42 научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов МГУП. — М., 2002. — С. 29—30.

24. *Таранов Р.В.*, *Маликов А.В.* Прогнозирование энергопотребления при помощи искусственных нейронных сетей с применением технологии CUDA // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. — 2016. — № 3. — С. 23—31.

25. *Булычев А.В.*, *Ванин В.К.* Патент на полезную модель № RU2121745 Способ защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю. Опубл. 21.03.2014.

26. *Минский М., Пейперт С.* Персептроны. Пер. с англ. — М.: Мир, 1971. — 262 с.

27 *Сидоров С.Г.*, *Вихарев А.В.*, *Чернышева Л.П.*, *Максимов С.Е.* Многопроцессорная реализация нейросетевого алгоритма прогнозирования изменения характеристик электрической изоляции: научное издание // Вестник ИГЭУ. — 2011. — № 1. — С. 99—101.

28. *Бабокин Г.И.*, *Степанов В.М.*, *Шпрехер Д.М.* Программно-аппаратные устройства диагностирования электромеханических систем // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2014. — № 8. — С. 83—78.

29. *Круглов В.В.*, *Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. — М.: Горячая линия, Телеком, 2001. — 382 с.

30. *Пятакович В.А.* Модели нейронных сетей для реализации изображений / Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. — 2009. — № 1. — С. 19—23.

31. *Ежов А.А., Шумский С.А.* Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе / Под общ. ред. В.В. Харитонова. — М.: МИФИ, 1998. — 224 с.

32. *Шпрехер Д.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611531. Программа диагностирования технического состояния электромеханических систем («ЭМС-НС»). — Заявл. 27.12.2010. № 2010618213. Опубл. 16.02.2011. ГИАБ

REFERENCES

1. Pasculescu D., Lupu L., Pasculescu V.M., Inisconi I. Study of electrocution hazards in three-phase electrical networks with ground-isolated neutral point. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2012. Vol. 11(7), pp. 1267—1271. DOI: 10.30638/eemj.2012.154.

2. Utegulov B. Special issues of ensuring electrical safety in networks with isolated neutral voltage up to 1000 V at mining enterprises. *Industrial Engineering*. 2018, pp. 1—29. DOI: 10.5772/intechopen.81384.

3. Varenik E.A., Lazebnik R.M. Increase of efficiency of functioning of devices of protec-tion against leakage currents in mine electric networks. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu*. 2011, no 11(186), pp. 81—84.

4. Neitzel D.K. Protection against hazards. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2010. Vol. 16(3), pp. 23—29. DOI: 10.1109/MIAS.2010.936121.

5. *Megger «A Stitch in Time...»* (The Complete Guide to Electrical Insulation Testing). 2006, p. 67.

6. *IEEE Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, 2008, pp. 1—26.

7. Langol'f E.L., Vylegzhanin V.N., Mazikin V.P. *Problemy effektivnosti restrukturizatsii ugol'noy promyshlennosti Kuzbassa* [Problems of efficiency of restructuring of the coal industry of Kuzbass], Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 1997, 248 p.

8. Grebchenko N.V., Sidorenko A.A. Intelligent system for determining the location and extent of local isolation defects in a network with isolated neutral. *Releynaya zashchita i avtomatika energosistem*. Sbornik dokladov [Relay protection and automation of power systems. Collection of reports], 2006, pp. 150—152.

9. Lapchenkov K.V. *Upravlenie sostoyaniem izolyatsii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh* [Control of insulation state in distribution electric networks], Candidate's thesis, Chelyabinsk, 1998, 119 p.

10. Bulychev A.V., Nudel'man G.S. Proactive relay protection functions. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoy NTK «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem»* [Scientific and technical conference «Modern directions of development of relay protection systems and automation of power systems], Moscow, 2009, pp. 72—78.

11. Utegulov B.B., Utegulov A.B., Uakhitova A.B., Begentaev B.M. Development of measures to improve the level of electrical safety in networks with a voltage of up to 1000 V mine «Capital» joint stock company «Maikainzoloto». *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2010, no 3, pp. 130—136. [In Russ].

12. Wang Xiu Yan, Li Cui Fang, Li Zong Shuai, Lin Jia Quan Research of airfield lighting insulation resistance prediction based on gray system theory. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 263—266, pp. 1279—1284. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.263-266.1279.

13. Remus Dobra, Mircea Risteiu, Dragos Pasculescu, Georgeta Buica Designing predictive diagnose method for insulation resistance degradation of the electrical power cables from neutral insulated power networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 209. International Conference on Innovative Research — ICIR Euroinvent 2017. Article 209 012093. DOI: 10.1088/1757-899X/209/1/012093.

14. Yusuf S., Brown D.J., Mackinnon A., Papanicolaou R. Application of dynamic neural networks with exogenous input to industrial conditional monitoring. *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2013. DOI: 10.1109/IJCNN.2013.6706762.

15. Yongmei Zhao, Junfeng Li, Lingjie Wu, Yanwen Wang High-voltage cable insulation online monitoring in coal mine based on pattern recognition. *AIP Confference Proceedings*. 2017.

Vol. 1820 Advances in Materials, Machinery, Electronics I, pp. 060015–1—060015–6. DOI: 10.1063/1.4977330.

16. Tovstik Yu. V., Savitskiy V. N., Stoyan V. N. Problems of protection against current leakage to the ground of distribution networks of coal mines, with power semiconductor elements. *Girnicha elektrotekhnika ta avtomatika: Nauk. tekhn. zb. NGU*. Vip. 74 [Mining electrical engineering and automation: Scientific and technical collection. National Mining University, Issue 74. Dnepropetrovsk, 2005, pp. 36—42.

17. Jie Wen, Tiejun Zeng, Feng Yan, Wenguang Chen Research on ON-LINE insulation monitoring instrument of IT power system in the down hole mine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 394, Article 042081. 2018, pp. 1—11. DOI: 10.1088/1757-899X/394/4/042081.

18. Dandan Su Analysis of low voltage cable insulation detection technology. *Advances in Engineering Research (AER)*. 2017. Vol. 130 5th International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology (FMSMT 2017), pp. 211—214. DOI: 10.2991/fmsmt-17.2017.44.

19. Zakharova A. G., Lobur I. A., Shauleva N. M. Examination of the state of explosion-proof electrical equipment at large enterprises. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2015, no 2, pp. 44—48. [In Russ].

20. Mit'kin Yu. A., Vikharev A. V., Prusakov M. V. Problems of estimation of technical condition of oil-containing insulation of high-voltage equipment in operation. *Vestnik IGEU im. V.I. Lenina*. 2006, no 2, pp. 1—5. [In Russ].

21. Khaykin S. *Neyronnye seti. Polnyy kurs*, 2-e izd. Per. s angl. [Neural networks. Complete course, 2nd edition, English–Russian translation], Moscow, Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.

22. Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, pp. 1483—1510.

23. Rodionov P. E. Classification of existing neural network paradigms. *Materialy 42 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov i aspirantov MGUP* [Materials of 42 scientific and technical conferences of teachers, employees and graduate students of Moscow State Institute of Press], Moscow, 2002, pp. 29—30. [In Russ].

24. Taranov R. V., Malikov A. V. Prediction of energy consumption using artificial neural networks using CUDA technology. *Vestnik astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2016, no 3, pp. 23—31. [In Russ].

25. Bulychev A. V., Vanin V. K. *Utility model patent RU 2121745*. 21.03.2014.

26. Minskiy M., Peypert S. *Perseptrony*. Per. s angl. [Perceptrons. English–Russian translation], Moscow, Mir, 1971, 262 p.

27 Sidorov S. G., Vikharev A. V., Chernysheva L. P., Maksimov S. E. Multiprocessor implementation of a neural network algorithm for pre-dicting changes in the characteristics of electrical insulation. *Vestnik ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2011, no 1, pp. 99—101. [In Russ].

28. Babokin G. I., Stepanov V. M., Shprekher D. M. Hardware-software devices for diagnosing electromechanical systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Tekhnicheskie nauki*. 2014, no 8, pp. 83—78. [In Russ].

29. Kruglov V. V., Borisov V. V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice], Moscow, Goryachaya liniya, Telekom, 2001, 382 p.

30. Pyatakovich V. A. Models of neural networks for the implementation of images. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2009, no 1, pp. 19—23. [In Russ].

31. Ezhov A. A., Shumskiy S. A. *Neyrokomp'yuting i ego primeneniya v ekonomike i biznese*. Pod red. V. V. Kharitonova [Neurocomputing and its applications in Economics and business. Kharitonov V. V. (Eds.)], Moscow, MIFI, 1998, 224 p.

32. Shprekher D. M. Certificate of state registration of computer programs RU 2010611531. 16.02.2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабокин Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор,
ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: babokinginov@yandex.ru,
Шпрехер Дмитрий Маркович — д-р техн. наук, доцент,
Тульский государственный университет, e-mail: shpreher-d@yandex.ru,
Колесников Евгений Борисович — канд. техн. наук, доцент,
Новомосковский филиал (институт) Российского химико-технологического университета, e-mail: kolesnikov55@mail.ru.
Для контактов: Шпрехер Д.М., e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.I. Babokin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
D.M. Shprekher, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Tula State University, 300012, Tula, Russia, e-mail: shpreher-d@yandex.ru,
E.B. Kolesnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Novomoskovsk Institute (branch) of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 301650, Novomoskovsk, Russia, e-mail: kolesnikov55@mail.ru.
Corresponding author: D.M. Shprekher, e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

Получена редакцией 13.02.2019; получена после рецензии 08.11.2019; принята к печати 20.01.2020.
Received by the editors 13.02.2019; received after the review 08.11.2019; accepted for printing 20.01.2020.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕСУРС ШИН И РЕДУКТОР МОТОР-КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ АПРИОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ

(2019, № 12, СВ 48, 12 с.)

Абдулаев Э.К.[1] — аспирант, e-mail: Ehldarabdulaev@mail.ru,
Махараткин П.Н.[1] — канд. техн. наук, доцент, *Кужелев А.И.*[1] — аспирант,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

Рассмотрены факторы, влияющие на ходимость шин и срок службы редуктор мотор-колеса, провести их априорное ранжирование для определения степени значимости каждого. Эта проблема важна для предприятий, так как шины и редуктор мотор-колесо составляют большую часть затрат при эксплуатации пневмоколесной техники.

Ключевые слова: экономические затраты, эксплуатация оборудования, месторождение, горная автотранспортная техника.

DETERMINATION OF THE MOST SIGNIFICANT FACTORS AFFECTING THE LIFE OF TIRES AND GEAR MOTOR-WHEELS USING A PRIORI RANKING

E.K. Abdulaev[1], Graduate Student, Ehldarabdulaev@mail.ru,
P.N. Maharathis[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, *A.I. Kuzhelev*[1], Graduate Student,
[1] Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The factors affecting the running capacity of tires and the service life of the motor-wheel reducer are considered, and their a priori ranking is carried out to determine the degree of significance of each. This problem is important for enterprises, as tires and gear motor-wheel account for most of the costs in the operation of pneumatic equipment.

Key words: economic costs, equipment operation, oilfield, mining and automotive equipment.