



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>

УДК 621.31:622

**Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров**

Р. В. Клюев

Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

kluev-roman@rambler.ru**Аннотация**

В области проектирования систем электроснабжения карьеров важная роль отводится вопросам анализа надежности элементов, которые могут быть решены в ходе проведения комплексного применения различных методов расчета отдельных видов электрооборудования и сетевых устройств в системах электроснабжения. Целью работы является установление оптимальных параметров электроснабжения рудника открытых горных работ горно-обогатительных комбинатов, проведение исследований, позволяющих создать технико-экономическую модель системы. Установлено, что математическая статистика дает ряд методов установления однородности (или разнородности) совокупности значений случайной величины. При анализе данных аварийной статистики электрооборудования наиболее приемлемым является метод сравнительной оценки двух выборочных средних (по сравнению с методом сравнения эмпирического распределения с нормальным или методом скользящей средней). В работе приведены обработанные на основе данных аварийности электрооборудования рудничных подстанций и сетевых устройств карьера, также представлены соотношения между надежностью схемы и ее элементами и показано влияние надежности защиты на надежность схемы. Представлены методы оптимизации систем электроснабжения карьеров, заключающиеся в применении градиентных методов первого порядка, методов второго порядка или так называемых квадратичных методов оптимизации, методов случайного поиска. В качестве наиболее распространенных для решения задач нелинейного программирования используется группа градиентных методов, среди которых в первую очередь следует рассматривать метод наискорейшего спуска. Сочетание случайного поиска с методом штрафных функций дает возможность определять условные экстремумы для задачи оптимизации режима работы электрической сети и системы. Также рассматривается метод случайного спуска, заключающийся в определении минимума целевой функции по соответствующему алгоритму, при котором направление движения в общем случае задается случайным вектором, равномерно распределенным по гипосфере.

Ключевые слова

надежность элементов, система электроснабжения, карьер, градиентные методы, аварийность, рудничные подстанции, случайный поиск, целевая функция

Для цитирования

Klyuev R. V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):183–194. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Reliability analysis of open-pit power supply system components

R. V. Klyuev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

kluev-roman@rambler.ru**Abstract**

In the field of designing power supply systems of open pits an important role is attributed to the problems of components reliability analysis, which can be solved by integrated application of different analysis methods for individual types of electrical equipment and network devices in power supply systems. The purpose of the work is to establish optimal parameters for an open-pit mine power supply at mining and processing complexes, and to conduct research that allows a technical and economic model of the system to be created. It has been established that mathematical statistics provides a number of methods for establishing the homogeneity (or heterogeneity) of the population of random variable values. When analyzing the data of failure statistics of electrical equipment, the method of comparative estimate of two sample averages (compared to the method of comparing the empirical distribution with the normal distribution or the moving average method) is the most acceptable. The paper presents accident rates of electrical equipment of open-pit substations and network devices of the quarry processed on the basis of data, also presents the relationship between the reliability of the circuit and its elements and shows the influence of protection reliability on the reliability of the circuit. Methods of optimizing open-pit power supply systems are presented, which consist in the use of first-order



gradient methods, second-order methods or the so-called quadratic optimization methods, and random search methods. A group of gradient methods is the most widespread for solving nonlinear programming problems, among which the method of steepest descent should be considered primarily. The combination of random search with the penalty function method makes it possible to determine conditional extrema for the problem of optimizing the electrical grid and system operation mode. The method of random descent, which consists in determining the minimum of the target function according to an appropriate algorithm, is also considered, in which the direction of motion is generally given by a random vector uniformly distributed over a hypersphere.

Keywords

reliability of components, power supply system, open pit, gradient methods, accident rate, mine substations, random search, target function

For citation

Klyuev R.V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):183–194. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>

Введение

Выполнение задач, поставленных перед горно-рудной промышленностью, невозможно без дальнейшего увеличения эффективности производства, производительности труда и автоматизации производственных процессов, повышения уровня эффективности горного производства и использования электрооборудования [1, 2].

Рост энерговооруженности труда приводит к увеличению затрат на создание и эксплуатацию системы электроснабжения (СЭС). В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы построения оптимальной СЭС не только горного предприятия в целом, но и отдельных его подсистем, решаемые на стадии проектирования, а также вопросы построения моделей надежности СЭС [3, 4].

Применение в проектной практике методов оптимизации, в том числе с использованием искусственного интеллекта, позволит значительно повысить качество проектирования в соответствии с задачами необходимости улучшения проектного дела на основе широкого внедрения в практику проектирования достижений науки [5, 6].

Достигнутый научно-технический прогресс в технике и технологии открытых горных работ (высокая степень концентрации горных работ, эксплуатация крупных глубоких карьеров, неуклонный рост установленной мощности горных машин и электровооруженности труда) ставит в области проектирования электроснабжения карьеров ряд технико-экономических проблем повышения эффективности, требующих неотложного решения.

Эффективность работы СЭС карьеров зависит не только от качества применяемого оборудования [7, 8], но и от правильности принимаемых проектных решений и качества проектной документации. Однако в настоящее время проектирование СЭС осуществляется традиционными методами, разработанными для условий карьеров сравнительно небольшой производительности и глубины. При проектировании недостаточно учитываются сложные взаимосвязи между параметрами системы, электрическими нагрузками и горно-геометрическими, техническими и технологическими параметрами современных карьеров. Расчет электрических нагрузок производится по коэффициентам спроса, а выбор схемы электроснабжения осуществляется на основе технического сравнения

ограниченного числа вариантов без учета динамики горных работ и изменения электрических нагрузок, что не может обеспечить выбор ее оптимальных параметров.

При решении технико-экономических задач проектирования электроснабжения проектные институты не могут широко использовать возможности вычислительной компьютерной техники из-за отсутствия алгоритмов, пригодных для специфических условий открытых горных работ. Это практически исключает многовариантные и оптимизационные расчеты, приводит к ухудшению качества и увеличению сроков подготовки проектов при резком повышении объемов проектных работ.

Целью работы является установление оптимальных параметров электроснабжения рудника открытых горных работ (РОГР) горно-обогатительных комбинатов (ГОК), проведение исследований, позволяющих исследовать надежность отдельных элементов СЭС, чтобы в дальнейшем рассматривать безопасность работы в электрических сетях горной промышленности [9, 10].

Анализ существующих схем электроснабжения рудников открытых горных работ

Аварийность отдельных элементов сетей и электрооборудования предприятий зависит от многих возмущающих факторов, от состояния произведенных монтажных и ремонтных работ, разнообразных эксплуатационных условий, их технического состояния и т.д. [11, 12]. Влияние каждого из этих факторов в отдельности бывает нередко незначительно и практически незаметно, но суммарный эффект воздействия приводит к колеблющимся от случая к случаю результатам. Следовательно, показатели аварийности можно рассматривать как некоторую случайную величину, являющуюся предметом изучения математической статистики и теории вероятностей. Исходя из статистического характера явления аварийности и из сущности понятия вероятности некоторого события количественно выражение понятия надежности можно сформулировать следующим образом – надежность – есть вероятность того, что составной элемент или установка в целом будут удовлетворительно работать в течение определенного периода времени. Например, если продолжительность аварийного простоя установки в течение года равна 8,76 ч, то вероятность ее аварии $P = 8,76/8760 = 10^{-3}$, а надежность $P' = 1 - 10^{-3}$.

Метод расчета надежности отдельных видов электрооборудования и сетевых устройств

В электрических распределительных сетях и системах повреждение отдельных видов элементов может вызвать простой части или всей установки на время нахождения и ликвидации аварии – время аварийного простоя, или на время нахождения аварии и последующего отключения поврежденного участка – время аварийного отключения [13, 14].

По эксплуатационным данным о продолжительности аварийного простоя и аварийного отключения x основных видов электрооборудования и сетевых устройств, применяемых на карьерах, определены две наиболее важные статистические характеристики: взвешенное среднее аргумента \bar{x} и стандарт σ_x .

Сравнение полученных средних значений и стандартов показывает, что значение коэффициента изменчивости k рассматриваемых вариационных рядов сохраняет некоторое постоянное значение с максимальным отклонением отдельных его значений от средней величины до 4%:

$$k = \frac{\sigma_i}{x_i} \quad (1)$$

Следовательно, практически для всех выборочных распределений справедливо соотношение:

$$\sigma_i = k\bar{x}_i \quad (2)$$

Полученное соотношение указывает на одинаковую закономерность распределения всех рассматриваемых вариационных рядов и на то, что следует ожидать практически постоянного значения стандарта аргумента преобразующей функции для всех выборочных распределений.

Для выявления закона распределения наблюдаемых частот времени аварийного простоя и времени аварийного отключения на вероятностную бумагу наносят диаграмму квантилей распределения аргументов для некоторых видов электрооборудования (рис. 1).

Как видно из диаграммы квантилей, точки значений некоторых функций распределений группи-

руются около кривых, напоминающих логарифмическую кривую.

На рис. 2 на логарифмически вероятностной бумаге изображены новые диаграммы квантилей. Из диаграммы видно, что точки весьма близко группируются около прямых, причем более или менее заметное отклонение точек от прямой наблюдается лишь до 5% и свыше 95% квантилей.

Для графической оценки полученных отклонений значений функции распределения от прямой (рис. 3) проведены кривые допустимых величин аварийных отклонений от теоретической линии при надежности (вероятности) $P = 0,95$.

Из рис. 3 видно, что допустимая величина случайных отклонений от теоретической линии значительно больше при значениях P , близких к 0 или 100%, чем при значениях, близких к 50%. Поэтому наблюдаемое заметное отклонение точек значений функций распределения от прямой до 5% и свыше 95% квантилей (см. рис. 2) не может заметно изменить закона выборочного распределения. Кроме того, число наблюдений в указанных пределах не превышает 10% от объема выборки. Сравнение кривых допустимых величин случайных отклонений от теоретической линии с полученными отклонениями значений функции выборочных распределений от прямой показывает, что последние находятся внутри допустимых границ случайных отклонений при $P = 0,95$ и $n > 250$. Следовательно, время аварийного простоя и время аварийного отключения как при поврежденных экскаваторных кабелях, так и при авариях карьерных сетей, распределено по логарифмически нормальному закону. Согласно результату графического анализа выравнивание выборочных распределений производится по уравнению:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma_u^2}}, \quad (3)$$

где $\Phi(u)$ – функция распределения; u_i – аргумент преобразующей функции; \bar{u} – среднее значение преобразованного аргумента; σ_u – стандарт преобразованного аргумента.

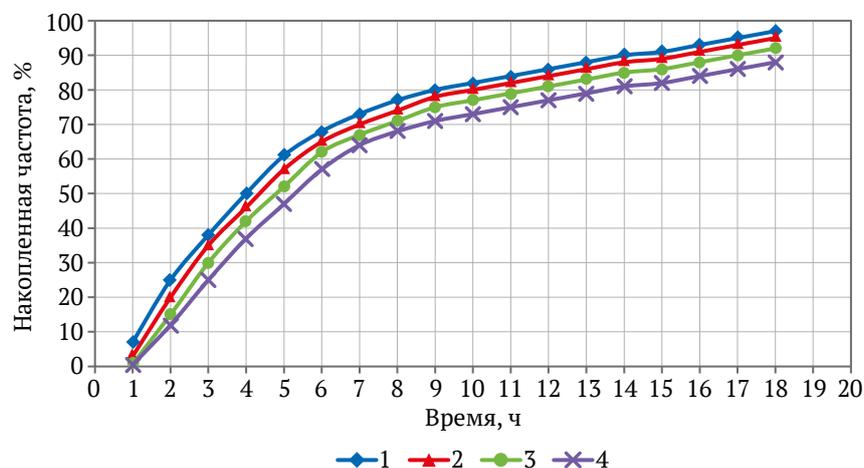


Рис. 1. Диаграммы квантилей распределения времени аварийного простоя и аварийного отключения экскаваторных кабелей и сетей карьера

Результаты аналитической оценки расхождения между выборочными и теоретическими частотами: $\lambda_1 = 0,307$ и $P_1 = 0,999$; $\lambda_2 = 0,818$ и $P_2 = 0,52$; $\lambda_3 = 0,448$ и $P_3 = 0,987$; $\lambda_4 = 0,942$ и $P_4 = 0,365$ (индексы P и λ соответствуют номерам линий, приведенных на рис. 1, 2). Случайные значения λ , которые больше или равны наблюдаемым значениям, могут встретиться с вероятностью большей, чем 0,365, т. е. различие между теоретическими и выборочными распределениями незначительно. Аналитическая проверка подтверждает выводы, полученные графическим анализом.

Наклон прямой к оси абсцисс диаграммы квантилей при логарифмически нормальном распределении определяется значением стандарта аргумента преобразующей функции.

Из диаграммы квантилей (см. рис. 2) видно, что величина стандарта преобразованного аргумента для всех распределений имеет весьма устойчивый характер, так как все прямые диаграммы находятся внутри незначительно удаленных друг от друга двух прямых.

Среднее значение стандарта преобразованного аргумента всех рассматриваемых распределений равно $\sigma_u = 0,347$. Максимальное отклонение отдельных его значений от средней величины составляет 20,1%, чем можно пренебречь и в первом приближении принять $\sigma_u = 0,347 = \text{const}$ ($\sigma_u = \lg u_{60} - \lg u_{15,9}$, где u_{60} , $u_{15,9}$ – соответственно 60% и 15,69% квантили).

На основе подобных анализов, произведенных для всех основных элементов схем электроснабжения карьеров, установлено, что:

1. Время аварийного простоя и время аварийного отключения подчинено логарифмически нормальному закону.

2. Стандарт аргумента преобразующей функции практически сохраняет постоянное значение.

При логарифмически нормальном распределении имеет место соотношение:

$$M(\lg u) = \lg \varepsilon, \tag{4}$$

где $M(\lg u)$ – математическое ожидание логарифма наблюдаемого аргумента; $\lg \varepsilon$ – среднее значение преобразованного аргумента.

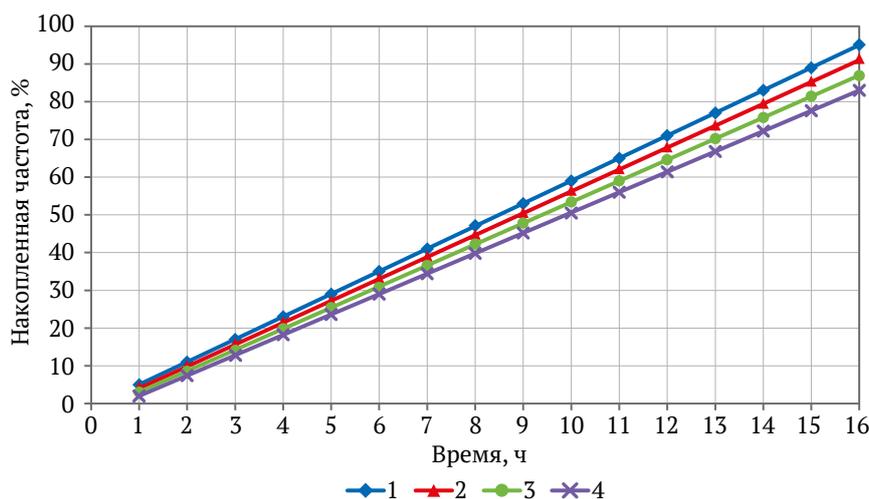


Рис. 2. Новые диаграммы квантилей распределения времени аварийного простоя и аварийного отключения экскаваторных кабелей и сетей карьера

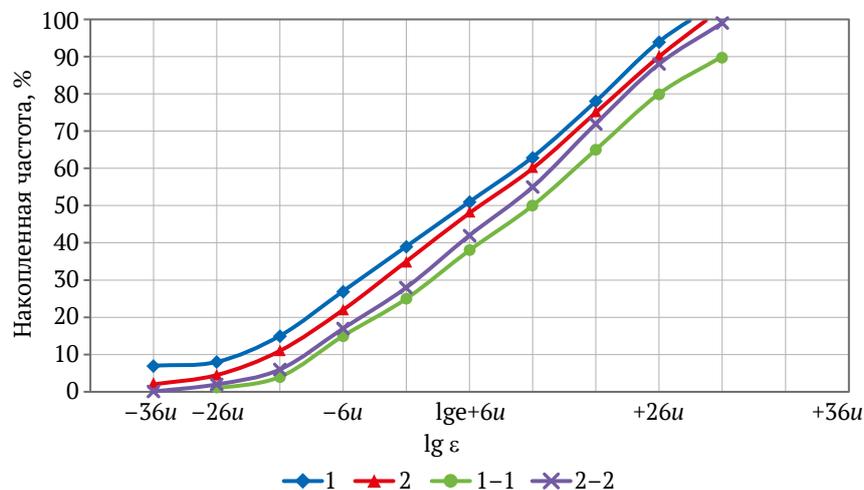


Рис. 3. Кривые допустимых случайных отклонений от теоретической линии при надежности $P = 0,95$, 1–1 при $n = 100$, 2–2 при $n > 250$



Величина $\lg \varepsilon$ является медианой Me в распределении преобразованного аргумента, а квантили преобразованной величины совпадают с преобразованными квантилями первоначальной величины, если только преобразование осуществляется неубывающей функцией. Следовательно, величина ε должна быть равна медиане в распределении x . Медиана же меняется, если любые значения аргумента меньше медианы изменяются как угодно, оставаясь при этом изменением меньше Me . Это свойство медианы и то обстоятельство, что вероятности появления определенного числа наблюдений слева и справа от медианы равны между собой, позволяют использовать их для определения средних значений аргумента при относительно незначительных объемах выборки.

На основе известного соотношения:

$$\lg \bar{x} = \lg \varepsilon + 1,151 \sigma_u^2 \quad (5)$$

можно записать:

$$\lg \bar{x} = \lg \varepsilon + 0,1387. \quad (6)$$

По полученному равенству можно определить среднюю величину значений рассматриваемых параметров аварий и произвести практически ее точную оценку при весьма незначительных объемах выборки, даже при $n = 25$. При этом полученные значения средних величин находятся в пределах доверительных границ, определяемых точностью 0,15 от средней величины, определенной при объемах выборки, превышающих 150–200, и имеющих надежность, практически равную значению 0,9. Средние величины, определенные с такой точностью и надежностью, вполне применимы как исходные данные для определения количественных показателей надежности электрической сети.

Проведенные анализы показывают, что годовые продолжительности аварийного простоя электрооборудования карьеров также распределены по логарифмическому нормальному закону и значения стандарта преобразованного аргумента имеют отклонения, не превышающие 20% от определенного среднего значения стандарта $\sigma_u = 0,347$. Следовательно, время аварийного простоя отдельных видов электрооборудования и сетевых устройств в год также можно вычислить предложенным способом, не определяя их среднюю повреждаемость в год с последующим умножением на среднюю продолжительность аварийного простоя.

Для определения показателя надежности схем электроснабжения необходимо знание и третьего параметра аварии – среднего значения количества аварий в год отдельных видов электрооборудования и сетевых устройств.

Определение арифметической средней числа аварий не представляет затруднений, но определение статистической средней, необходимой для вычисления количественных показателей надежности, сопряжено с некоторыми затруднениями (трудностями), связанными с необходимостью учитывать степень влияния возмущающих факторов на значения параметров аварий.

Отдельные значения параметров аварий, обладающие общим средним уровнем, отклонения от которого оказываются случайными, составляют однород-

ную совокупность. В этом случае значение их средней арифметической является средней в статистическом смысле и, выражая средний уровень, обобщает случайные отклонения. Если часть их возмущающих факторов вызывает систематическое отклонение значений параметров аварий от некоторого уровня, наряду со случайными величинами, то она создает новый уровень (средний), образуя тем самым разнородную совокупность. Арифметическая средняя теряет познавательный смысл при попытках использования ее для характеристик значений параметров аварий, составляющих разнородную совокупность, так как невозможно каким-либо показателем выразить не существующий в разнородной совокупности средний уровень. В этом случае для получения статистической средней необходимо разнородную совокупность расчленить на однородные и затем определить среднюю величину для каждой однородной совокупности параметров аварий и, если есть в этом необходимость, то установить форму и меру корреляционной связи между значениями параметров аварий и возмущающими факторами.

Математическая статистика дает ряд методов установления однородности (или разнородности) совокупности значений случайной величины. При анализе данных аварийной статистики электрооборудования наиболее приемлемым является метод сравнительной оценки двух выборочных средних по сравнению с методом сравнения эмпирического распределения с нормальным или методом скользящей средней.

Сущность рекомендуемого метода применительно к обработке данных об авариях заключается в том, что по данным выборки при определенной совокупности возмущающих факторов определяется значение \bar{x}_1 . После исключения из совокупности факторов те факторы, влияние которых на образование среднего уровня выясняется, производится новая выборка и также определяется средняя \bar{x}_2 . Затем определяется критерий:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 + n_2) \left[\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \sum (x_2 - \bar{x}_2)^2 \right]}{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}}} \quad (7)$$

По найденному значению t и по числу степеней свободы k по таблице вероятностей распределения Стьюдента находится вероятность P , с которой можно ожидать значение t численно равным или большим, чем наблюдаемое (вычисленное) значение. Если при этом $P > 0,95$, сравниваемые средние различаются незначительно и значения параметров аварий образуют однородную совокупность. Число степеней свободы определяется как число не зависящих друг от друга значений параметров аварий. Если для некоторой выборки объема n_1 значения параметров аварий должны удовлетворять h условиям, связывающим их, то число степеней свободы равно: $k = n_1 - h$.

Показатели аварийности

Обработанные на основе данных аварийности электрооборудования [15, 16] рудничных подстанций и сетевых устройств карьера приведены в табл. 1.



Соотношения между надежностью схемы и ее элементами

С использованием положений теории вероятностей и приведенных в табл. 1 данных получены соотношения между надежностью схемы, отдельных ее цепей и элементов при различных способах соединения:

– при последовательном соединении авария каждого элемента вызывает нарушение работы всей установки и потому: $P' = 1 - \sum p_i$, $P'' = \sum p_i$;

– при параллельном соединении перерыв в электроснабжении может произойти лишь при выходе из строя всех параллельных цепей, поэтому: $P' = 1 - p_1 p_2$, $P'' = p_1 p_2$;

– при смешанном соединении:

$$P' = (1 - p_1 p_2) \cdot (1 - p_3), P'' = p_1 p_2 + p_3,$$

где p_i – вероятность аварий отдельных параллельных цепей и элементов схемы; p_1, p_2 – вероятность аварий отдельных параллельных цепей и элементов; p_3 – вероятность аварий последовательной цепи или элемента при смешанном соединении; P', P'' – надежность и вероятность аварии схемы.

При выводах аварийности отдельных элементов и цепей схемы рассматриваются как события, не зависящие друг от друга.

Влияние надежности защиты на надежность схемы

Исходя из сущности понятия вероятности некоторого события для определения вероятности неправильного действия защиты p_3 необходимо за число всех случаев, принадлежащих к некоторому определенному плану стохастических испытаний, принять какое-либо определенное количество срабатываний защиты S , а за число случаев, благоприятствующих

неправильному действию защиты, – статистическую среднюю количество неправильного действия защиты m при принятом числе срабатываний, т.е.:

$$p_3 = mS. \tag{8}$$

Продолжительность простоя системы шин T при неправильных действиях защиты p_3 можно определить из выражения:

$$T = np_3 t, \tag{9}$$

где n – общее число аварий на отходящих от шин фидерах; t – статистическая средняя продолжительность простоя шин при неправильном действии защиты.

Влияние работы защиты на надежность схемы определяется из выражения:

$$P = \frac{T}{8760} = \frac{np_3 t}{8760}. \tag{10}$$

Методика анализа схем по надежности

При оценке электрических схем по надежности особое место занимают сборные шины подстанций (п/ст) и распределительных пунктов (РП), показатели надежности которых зависят не только от аварийности самих сборных шин, но и от количества аварий на отходящих от них фидерах и работы защит. Так, на вероятность перерыва электроснабжения потребителя А (рис. 4) влияет не только авария цепи, по которой передается энергия, но и авария на других отходящих от шин 2 фидерах.

Поэтому сборные шины 2 (см. рис. 4) с отходящими от них фидерами необходимо заменить другим условным элементом, например, элементом с аварийностью, равной сумме аварийности шин и вероятности совпадения аварий на фидерах с неправильной работой защит. Тогда для определения вероятности

Таблица 1

Аварийности электрооборудования рудничных подстанций и сетевых устройств карьера

№ п/п	Наименование электрооборудования и сетевых устройств	Число повреждений на 1 объект, раз/год	Вероятность аварийного отключения	Вероятность аварийного простоя
1	Гибкие кабели	3,65	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$13,1 \cdot 10^{-4}$
2	Внутрикарьерные ЛЭП при числе экскаваторов x , расположенные – на вскрыше – на внешних отвалах – на внутренних отвалах	$y = 4,7 \cdot x + 1,7$ $y = 1,32 \cdot x + 0,87$ $y = 2,5 \cdot x + 0,67$	$0,595 \cdot 10^{-4}$ $0,595 \cdot 10^{-4}$ $0,595 \cdot 10^{-4}$	$13,5 \cdot 10^{-4}$ $4,6 \cdot 10^{-4}$ $6,66 \cdot 10^{-4}$
3	Передвижные подстанции	0,99	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
4	Ящики типа РВНО и ВЯП	0,228	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$
5	Трансформаторные точки внутри карьера и на отвалах	0,111	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$0,29 \cdot 10^{-4}$
6	Карьерные пункты питания с разъединителями	2,3	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-4}$
7	Электрооборудование экскаваторов (до разъединителя)	0,6	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
8	ЛЭП на дневной поверхности	0,402	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
9	ЛЭП между подстанциями	0,302	$0,595 \cdot 10^{-4}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$
10	Сборные шины с максимальной защитой на отходящих фидерах при неправильной работе защит на одно аварийное отключение защит	–	$0,35 \cdot 10^{-6}$	–
11	Присоединения	0,098	–	$0,35 \cdot 10^{-4}$

перерыва электроснабжения потребителя А получим расчетную схему из последовательно соединенных элементов (рис. 5), из которой:

$$P_A = \sum p_i, \quad (11)$$

где p_i – вероятность аварии отдельных элементов расчетной схемы.

При определении вероятности аварии условного элемента Ш для другого приемника, например Б, число аварийных отключений отходящих фидеров может быть несколько отличным, чем для потребителя А, и обусловлено разностью количества аварий на фидерах потребителей А и Б. Указанная разность по сравнению с общим числом аварий на отходящих фидерах весьма незначительна, поэтому при практических расчетах ею можно пренебречь и принять вероятность аварии элемента Ш одинаковой для всех приемников (фидеров). Дальнейшее изложение методики определения показателя надежности производим на конкретном примере (рис. 6).

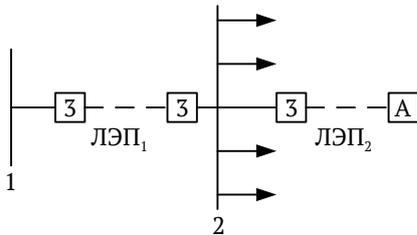


Рис. 4. Расчётная схема электрической сети

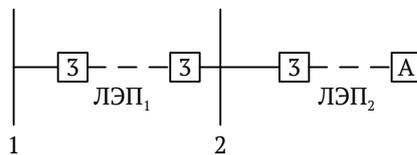


Рис. 5. Расчетная схема из последовательно соединенных элементов

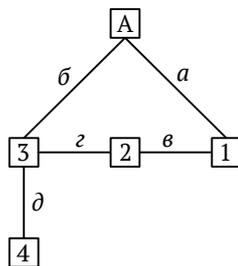


Рис. 6. Пример изложения методики определения показателя надежности

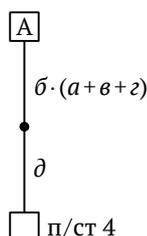


Рис. 7. Замена схемы рис. 6

Определяем показатели надежности п/ст 1, 2, 3, 4 и всей сети, если:

I вариант

1. Вероятность аварий связей между подстанциями равна a, b, v, z, d .

2. Мощности приемников п/ст 1, 2, 3, 4 имеют соотношения: $N_1 : N_2 : N_3 : N_4 = 2 : 3 : 5 : 2$.

3. Пропускная способность связей равна: $N_{A-1} = N_{A-3} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, N_{1-2} = N_2 + N_3 + N_4, N_{2-3} = N_1 + N_2$.

4. Надежность работы подстанций равна 1, защита на всех подстанциях работает идеально.

Для п/ст 4 аварийность участка схемы от районной п/ст А до п/ст 3, имеющего две параллельные ветви с вероятностями аварий $b, a + v + z$ равна: $b(a + v + z)$. Следовательно, рассматриваемую схему для п/ст 4 можно заменить схемой, показанной на рис. 7, откуда вероятность перерыва электроснабжения п/ст 4 равна: $P_4 = b(a + v + z) + d$.

Вероятности перерыва питания п/ст 1, 2, 3 соответственно равны: $a(v + b + z), (a + v) \cdot (b + z), b(a + v + z)$.

II вариант

Изменим условие 3 и примем, что $N_{A-1} = N_1 + N_2 + N_3, N_{A-3} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, N_{1-2} = N_2 + N_3, N_{2-3} = N_1 + N_2$.

Вероятность перерыва питания п/ст 1, 2, 3 при этом не изменяется, но существенно меняется вероятность аварии схемы по отношению к п/ст 4, так как связь А–1–2–3 к п/ст 3 при аварии связи А–3 не в состоянии по мощности питать энергией п/ст 4. Вероятность перерыва электроснабжения п/ст 4 определяется аварийностью связей А–3 и 3–4 и равна: $P'_4 = b + d$.

Таким образом, одна и та же схема при одних и тех же потребителях в зависимости от мощностей отдельных участков схемы имеет различные показатели надежности.

III вариант

Изменим условие 2 и примем, что $N_1 : N_2 : N_3 : N_4 = 5 : 1 : 2 : 4$.

Значения вероятностей перерыва электроснабжения отдельных п/ст не изменятся, но меняются мощности приемников каждой п/ст, кВт·ч. Поэтому изменение соотношений между мощностями п/ст рассматриваемой схемы изменяет продолжительность простоя приемников всей схемы. Из сказанного следует, что сумма вероятностей перерыва электроснабжения отдельных п/ст (приемников без учета их мощностей) не может являться показателем надежности всей схемы. Учет мощностей п/ст (приемников) может быть произведен, если вероятность перерыва электроснабжения п/ст привести к одной и той же мощности, например, к суммарной мощности всех п/ст, путем умножения их на соотношение мощностей отдельных п/ст к их суммарной мощности. Полученные в результате приведения новые значения вероятности перерыва электроснабжения отдельных п/ст, имеющие одинаковую значимость с точки зрения продолжительности простоя приемников, позволяют преобразовывать рассматриваемую схему в однолинейную схему с одним условным приемником, мощность которого равна сумме мощностей всех п/ст (приемников).

Преобразование согласно условиям рассматриваемых вариантов схемы приведено на рис. 8.

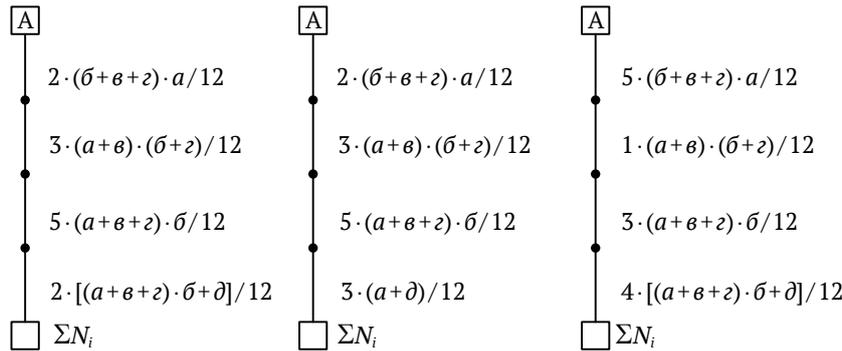


Рис. 8. Преобразование согласно условиям рассматриваемых вариантов схемы

Результаты подсчетов вероятностей перерыва электроснабжения всех приемников схемы в предположении, что $a-b-v-z-d$ равны:

I вариант – $3\frac{1}{4}a^2 + \frac{1}{6}a$,

II вариант – $2\frac{3}{4}a^2 + \frac{1}{3}a$,

III вариант – $3\frac{1}{12}a^2 + \frac{1}{3}a$.

Таким образом, анализ схем по надежности следует производить в следующем порядке:

1. Шины подстанций и РП заменить условными элементами Ш_р, вероятность аварии которых определяется суммой вероятности аварий самих шин и вероятности совпадения аварий на отходящих фидерах с неправильной работой защит.

2. Определить вероятность перерыва электроснабжения каждого приемника (подстанции) с учетом мощностей отдельных участков схемы. При сложных схемах для упрощения расчета преобразовать их в расчетные схемы для каждого приемника (подстанции).

3. Привести вероятности перерыва электроснабжения отдельных потребителей к их суммарной мощности и по приведенным вероятностям составить расчетную схему с одним условным потребителем суммарной мощности.

4. Определить вероятность перерыва электроснабжения всех приемников схемы.

Методы оптимизации систем электроснабжения карьеров

Центральным вопросом при разработке любой подсистемы САПР является определение оптимальных параметров этой подсистемы. Только в этом случае преимущества автоматизации проектирования могут быть реализованы полностью [17, 18].

Разнообразие содержания практических задач, находящее свое отражение в существующих математических моделях, настолько велико, что обычно приходится исследовать многие способы достижения оптимума. Ни один из методов оптимизации не является универсальным с точки зрения применения к любой конкретной задаче, но и не выступает изолированно от других.

Задачу оптимизации математически можно сформулировать следующим образом: имеется функция F нескольких переменных X_n . Эти переменные связаны между собой k -уравнениями или неравенствами вида:

$$\begin{aligned} W_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &\geq 0; \\ &\dots \\ W_k(X_1, X_2, \dots, X_n) &\geq 0, \end{aligned} \tag{12}$$

где W_1, W_k – некоторые функции переменных X_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Требуется найти минимум (максимум) функции F . Можно выделить три направления решения указанной задачи, основанных на применении:

- градиентных методов первого порядка;
- методов второго порядка или так называемых квадратичных методов оптимизации;
- методов случайного поиска.

Наиболее распространенной для решения задач нелинейного программирования является группа градиентных методов, среди которых в первую очередь следует рассматривать метод наискорейшего спуска.

Поиск минимума с помощью метода наискорейшего спуска заключается в последовательном применении для вычисления основных переменных следующего выражения:

$$X_j^{(k+1)} = X_j^{(k)} + h \frac{\partial \Phi}{\partial X_j^{(k)}}, \tag{13}$$

где $X_j^{(k+1)}$ – уточненные значения искомых параметров на $(k+1)$ итерации; $X_j^{(k)}$ – значение параметров на k -й итерации; h – коэффициент длины шага; $\partial \Phi / \partial X_j^{(k)}$ – значения частных производных от целевой функции по основным переменным на k -й итерации.

Значения производных на очередной итерации удобно представлять в виде матрицы.

Коэффициент длины шага можно вычислить по формуле:

$$h = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X_j} \right)^2}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X_j \partial X_k} \frac{\partial \Phi}{\partial X_j} \frac{\partial \Phi}{\partial X_k} \right)}. \tag{14}$$



Пусть необходимо минимизировать функцию $U(Z)$ с непрерывным градиентом при ограничениях: $W(Z) = 0, Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}$.

Вектор параметров Z представляется как совокупность векторов X и Y (зависимых и независимых параметров). При этом задачу можно представить как минимизацию неявной функции:

$$U[X(Y), Y] = I(Y). \quad (15)$$

При ограничениях: $X_{\min} \leq X(Y) \leq X_{\max}, Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}$, где $X(Y)$ – неявная функция, определяемая уравнением установившегося режима:

$$W(X, Y) = 0. \quad (16)$$

Задачу предлагается решать в два этапа: ввод режима в допустимую область и определение минимума целевой функции в допустимой области.

Пусть имеется задача ввода в допустимую область режима. При $Y^{(0)}$ из уравнения (16) вычисляется $X = X^{(0)}$. Поправки ΔX к вектору исходного приближения $X^{(0)}$ определяются уравнением:

$$\frac{\partial W}{\partial X} \Delta X = -W, \quad (17)$$

где $\partial W / \partial X$ – матрица частных производных функции. На основе (15) вычисляется градиент:

$$\frac{\partial I}{\partial Y} = \frac{\partial I}{\partial Y} \Big|_0 = \frac{\partial I}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial Y}, \quad (18)$$

где

$$\frac{\partial X}{\partial Y} = \left[\frac{\partial W}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial W}{\partial Y}. \quad (19)$$

Допустимый вектор спуска V получается из градиента заменой нулями компонент соответствующих переменных, находящихся на границе и стремящихся выйти за допустимые пределы и изменить знак у остальных компонент.

Следующее приближение вектора Y :

$$Y^{(1)} = Y^{(0)} + Vt = Y(t), \quad (20)$$

где $t = \min(t_n, t_{np})$.

Значение t_n определяется методом Ньютона из выражения:

$$V \frac{\partial I}{\partial Y}(t) = 0. \quad (21)$$

Предельный шаг $t_{np} = \min(t_{inp})$ является решением уравнения:

$$Z_i[Y(t)] - Z_{i,inp} = 0, \quad (22)$$

где

$$Z_{i,inp} = \begin{cases} Z_{i,inp_{\max}} & \text{при } \frac{\partial Z}{\partial t} < 0, \\ Z_{i,inp_{\min}} & \text{при } \frac{\partial Z}{\partial t} > 0. \end{cases} \quad (23)$$

Окончание вычислительного процесса оптимизации контролируется по величине V с учетом изменений вектора Y и $I(Y)$ на ряде следующих друг за другом приближений.

К недостаткам данного метода следует отнести ухудшение сходимости при приближении к минимуму целевой функции, а также сложность алгоритма и трудоемкость ее реализации.

Для учета ограничений типа неравенств при применении градиентных методов предложено использовать метод штрафных функций.

В литературе приведена сеть градиентных методов оптимизации и дана их сравнительная характеристика.

Наиболее мощный метод оптимизации, основанный на градиентном способе первого порядка, предназначен для решения задач, минимизирующих функцию:

$$I = \sum_{i=1}^k I_i(X). \quad (24)$$

В отличие от метода приведенного градиента уравнение установившегося режима записывается в виде явных функций, и управление функциональными ограничениями осуществляется с помощью штрафных функций, тогда как в методе приведенного градиента – сменой базиса, т.е. обменом переменных векторов X и Y .

Методы оптимизации второго направления получили широкое распространение в многочисленных исследованиях.

Известен метод, решающий задачу комплексной оптимизации. Основная идея состоит в том, чтобы преобразовать первоначально нелинейную задачу с ограничениями в последовательность задач без ограничений, решение которых приближается к решению первоначальной задачи. Преобразованную задачу решают методом Флетчера–Пауэлла [19].

В научных работах проводится анализ различных способов преобразования исходной задачи. Анализ методов Фиакко и Мак–Кормика, Зангвилла, Пауэлла [20] показал целесообразность применения двух последних методов как не требующих начальной точки, удовлетворяющей ограничениям типа неравенств.

С использованием преобразования Зангвилла, соответствующего применению штрафных функций, формулируется следующая неограниченная функция:

$$F(X) = I(X) + \sum_{i=1}^r r_i \cdot W_i(X)^2 + \sum_{j=1}^p r_j \cdot g_j(X)^2. \quad (25)$$

В уравнении (25) член $g_j(X)$, представляющий собой ограничение типа неравенства, существует только тогда, когда это ограничение нарушается.

Согласно методу Флетчера–Пауэлла для квадратичной функции $f(X)$ справедливо соотношение:

$$f(\bar{X} - X) = l_j g(X), \quad (26)$$

где \bar{X} – точка максимума; l_j – обратная матрица вторых частных производных функции $f(X)$, называемой матрицей Гессе; $g(X)$ – вектор первых частных производных функции $f(X)$.

Разность в левой части соотношения (26) представляет собой расстояние между любой точкой X и точкой минимума. Для неквадратичной функции \bar{X} не является точным минимумом, однако эту точку



можно рассматривать в качестве начального приближения для следующей итерации по выражению (26).

Матрица l_j получается итеративно по алгоритму, для реализации которого требуются только первые производные целевой функции. После определения ΔX и новой точки матрицы l_j , которая сначала являлась единичной, пересчитывается добавлением к ней матриц коэффициентов:

$$l_j^{(i+1)} = l_j^{(i)} + A^{(i)} + B^{(i)}, \quad (27)$$

где

$$B_{jk}^{(i)} = \frac{(l_j^{(i)} Y^{(i)})_j (Y^{(i)T} l_j^{(i)})_k}{Y^{(i)T} l_j^{(i)} Y^{(i)}},$$

$$A_{jk}^{(i)} = \frac{\Delta X_j^{(i)} \Delta X_k^{(i)}}{\Delta X^{(i)T} Y^{(i)}},$$

$$Y^{(i)} = \frac{\partial f^{(i-1)}}{\partial X} - \frac{\partial f^{(i)}}{\partial X}.$$

Особенностью метода Флетчера–Пауэлла является отсутствие необходимости в вычислении обратной матрицы вторых частных производных.

К недостаткам метода следует отнести, во-первых, то, что матрица Гессе должна постоянно храниться в оперативной памяти компьютера и изменяться на каждом шаге алгоритма, во-вторых, при решении задач с большим числом переменных изменений в матрице l_j бывает недостаточно для получения таких значений ΔX , которые бы уменьшили $f(X)$.

Для ликвидации этих недостатков выдвигается идея непосредственной оценки матрицы Гессе:

$$H \Delta X = g(X), \quad (28)$$

где H – матрица Гессе.

Уравнение (28) решается относительно ΔX с помощью исключения Гаусса, заключающегося в приведении системы к треугольному виду. Основным недостатком метода является его зависимость от выбора начальной точки.

Статистические методы оптимизации систем электроснабжения изложены и разработаны Д.А. Арзамасцевым [21]. Рассматривается постановка задачи комплексной оптимизации режима электрической сети. Сочетание случайного поиска с методом штрафных функций дает возможность определять условные экстремумы для задачи оптимизации режима работы электрической сети и системы.

В рассматриваемой допустимой области k -факторного пространства выбирается начальная точка $X^{(0)}$ с координатами $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_k^{(0)}$ и в ней вычисляется значение целевой функции $T^{(0)}$. Для перехода в новую точку $X^{(1)}$ с координатами $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_k^{(1)}$ выбирается случайный вектор, равномерно распределенный по гипосфере радиуса h с центром в начале системы координат:

$$\Delta \bar{X}^{(0)} = (\Delta X_1^{(0)}, \Delta X_2^{(0)}, \dots, \Delta X_k^{(0)}). \quad (29)$$

Координаты точки $X^{(1)}$ определяются путем сложения двух векторов:

$$\bar{X}^{(1)} = \bar{X}^{(0)} + \Delta \bar{X}^{(0)}. \quad (30)$$

Значение целевой функции в точке $X^{(1)}$ равно $T^{(1)}$. Выполненный шаг считается удачным и точка $X^{(1)}$ принимается, если выполняется условие:

$$T^{(1)} < T^{(0)}. \quad (31)$$

В противном случае точка $X^{(1)}$ не принимается. Вновь выбирается случайный вектор и производится новая попытка сделать удачный шаг. Процесс перехода из точки $X^{(1)}$ в точку $X^{(2)}$ производится аналогичным образом.

Достоинство метода случайного поиска заключается в простоте структуры программной реализации на компьютере, высокой надежности и эффективности при решении многих задач нелинейного программирования. Это единственный метод, способный решать многоэкстремальные задачи. Он особенно эффективен при отсутствии аналитических выражений для градиента. В то же время при приближении к минимуму целевой функции по алгоритму случайного поиска возрастает число неудачных шагов, поэтому вблизи экстремума уточнение целесообразно проводить каким-либо детерминированным методом оптимизации, например, градиентом.

Разновидностью метода случайного поиска является метод случайного спуска.

При определении минимума целевой функции по алгоритму случайного спуска направление движения в общем случае также задается случайным вектором, равномерно распределенным по гипосфере. Однако, в отличие от алгоритма случайного поиска, направление выбирается не на каждом шаге. В выбранном случайным образом удачном направлении выполняется такое количество рабочих шагов, пока функция не начнет возрастать. В полученной точке вновь выбирается удачное направление, и спуск выполняется в этом направлении до тех пор, пока оно не исчерпает себя, и т.д. Таким образом, производится спуск в район искомого минимума.

Заключение

Проведен анализ существующих схем электроснабжения рудников открытых горных работ с точки зрения аварийности отдельных элементов сетей и электрооборудования карьеров и влияния на нее различных возмущающих факторов. На основе анализа для всех основных элементов схем электроснабжения карьеров установлено, что время аварийного простоя и время аварийного отключения подчинено логарифмически нормальному закону, стандарт аргумента преобразующей функции практически сохраняет постоянное значение. Проведенные анализы показывают, что годовые продолжительности аварийного простоя электрооборудования карьеров также распределены по логарифмически нормальному закону, и значения стандарта преобразованного аргумента имеют отклонения, не превышающие 20% от определенного среднего значения стандарта 0,347. Разработана методика анализа схем по надежности по нескольким вариантам, заключающаяся в определении вероятности перерыва



электроснабжения каждого приемника (подстанции) с учетом мощностей отдельных участков схемы и отдельных потребителей по отношению к их суммарной мощности. Представлены методы оптимизации систем электроснабжения карьеров, заключающиеся в применении градиентных методов первого порядка, методов второго порядка или так называемых квадратичных методов оптимизации, методов случайного поиска. В качестве наиболее распространенных для решения

задач нелинейного программирования используется группа градиентных методов, среди которых в первую очередь следует рассматривать метод наискорейшего спуска. Также рассматривается метод случайного спуска, заключающийся в определении минимума целевой функции по соответствующему алгоритму, при котором направление движения в общем случае задается случайным вектором, равномерно распределенным по гипосфере.

Список литературы / References

1. Пирогов Г.Г. Принципы вскрытия рудных месторождений при разработке на базе подземных горно-обогатительных комплексов. *Учёные записки Забайкальского государственного университета. Серия Физика, математика, техника, технология*. 2017;12(4):73–79. <https://doi.org/10.21209/2308-8761-2017-12-4-73-79>
Pirogov G.G. The principles of opening ore deposits in the development on the basis of underground mining complexes. *Scholarly Notes of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology*. 2017;12(4):73–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2308-8761-2017-12-4-73-79>
2. Каплунов Д.Р., Ломоносов Г.Г. Основные проблемы освоения недр при подземной разработке рудных месторождений. *Горный журнал*. 1999;(1):42–45.
Kaplunov D.R., Lomonosov G.G. Main problems of subsurface development during underground mining of ore deposits. *Gornyi Zhurnal*. 1999;(1):42–45. (In Russ.)
3. Тугай Ю.И., Гай А.В., Стахнюк С.В. Построение моделей надежности системы электроснабжения с использованием метода статистического моделирования Монте-Карло. *Агротехника и энергообеспечение*. 2015;1(5):96–107.
Tugai Yu.I., Gai A.V., Stachniuk S.V. The model's construction of power system reliability based on using Monte Carlo simulation. *Agrotekhnika i Energoobespecheniye*. 2015;1(5):96–107. (In Russ.)
4. Ершов С.В., Демьянов Д.В. Построение математических моделей надежности системы электроснабжения предприятия. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017;(12–1):118–125.
Ershov S.V., Demyanov D.V. The definition of indicators of system of power supply enterprise. *Izvestiya Tula State University. Technical Science*. 2017;(12–1):118–125. (In Russ.)
5. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17:101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>
6. Yaakoubi Y., Dimitrakopoulos R. Learning to schedule heuristics for the simultaneous stochastic optimization of mining complexes. *Computers & Operations Research*. 2023;159:106349. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106349>
7. Суслов Н.М., Чернухин С.А., Суслов Д.Н. Повышение энергоэффективности шагающего драглайна. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(3):131–139. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-131-139>
Suslov N.M., Chernukhin S.A., Suslov D. N. Increasing energy efficiency of walker dragline. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(3):131–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-131-139>
8. Клюев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А., Ляшенко В.И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3): 211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Lyashenko V.I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):211–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
9. Петров В.Л., Пичуев А.В. Оценка опасности несимметричных режимов утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях горных предприятий. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2022;(5):15–22.
Petrov V.L., Pichuev A.V. Hazard assessment of asymmetric modes for leakage current flowing through insulation in underground mine electrical grids. *Energy Safety and Energy Economy*. 2022;(5):15–22. (In Russ.)
10. Клюев Р.В., Голик В.И., Босиков И.И., Гаврина О.А. Обеспечение электробезопасности высокогорного карьера за счет выбора селективной релейной защиты в электрических сетях напряжением выше 1 кВ. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(9):31–37. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-9-31-37>
Klyuev R.V., Golik V.I., Bosikov I.I., Gavrina O.A. Ensuring electrical safety of a mountain quarry by choosing selective relay protection in the electrical networks with the voltage above 1 kV. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(9):31–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-9-31-37>



11. Пелипенко М.В., Баловцев С.В., Айнбиндер И.И. К вопросу комплексной оценки рисков аварий на рудниках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):180–192. <https://doi.org/25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>
12. Kulikova E. Yu., Balovtsev S.V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020)*. 6–12 September 2020, Sochi, Russia. 2020;62(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
13. Cabral E.A., Tofoli F.L., Sampaio R.F., Leão R.P.S. Reliability assessment applied in the design of an industrial substation in the context of Industry 4.0. *Electric Power Systems Research*. 2024;231:110365. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110365>
14. Singh K., Kalra Sh. Reliability forecasting and accelerated lifetime testing in advanced CMOS technologies. *Microelectronics Reliability*. 2023;151:115261. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115261>
15. Jia Q., Fu G., Xie X. et al. Enhancing accident cause analysis through text classification and accident causation theory: A case study of coal mine gas explosion accidents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;185:989–1002. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.066>
16. Li W., Wang L., Ye Zh. et al. A dynamic combination algorithm based scenario construction theory for mine water-inrush accident multi-objective optimization. *Expert Systems with Applications*. 2024;238(A):121871. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121871>
17. Певзнер Л.Д., Киселев Н.А. Система автоматического управления процессом черпания шагающего экскаватора-драглайна. *Горные науки и технологии*. 2022;7(1):57–65. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>
18. Соколов А.А., Орлова Л.Г., Башмур К.А. и др. Моделирование различных режимов работы трансформаторов, применяемых на подстанциях горнодобывающей промышленности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11–1):278–291. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_278
19. Sokolov A.A., Orlova L.G., Bashmur K.A. Ensuring uninterrupted power supply to mining enterprises by developing virtual models of different operation modes of transformer substations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11–1):278–291. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_278
20. Yokoyama K., Yoshii A., Adachi T., Kasai R. Application of Fletcher-Powell's optimization method to process/device simulation of MOSFET characteristics. *Solid-State Electronics*. 1982;25(3):201–203. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(82\)90108-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(82)90108-3)
21. Sieniutycz S., Jezowski J. 1 – Brief review of static optimization methods. In: *Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells*. 3rd Edition. Elsevier; 2018. Pp. 1–41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102557-4.00001-3>
21. Мисриханов М.Ш., Русина А.Г. Инновационный подход к решению режимных задач при управлении электроэнергетическими системами. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2012;(3):22–27
21. Misrikhanov M.Sh., Rusina A.G. Innovative approach to solving regime problems in managing electric power systems. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2012;(3):22–27. (In Russ.)

Информация об авторе

Роман Владимирович Клюев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.org/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Information about the author

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Department of Engineering and Technology of Mining and Oil and Gas Production, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.org/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024
Поступила после рецензирования 17.04.2024
Принята к публикации 10.05.2024

Received 13.03.2024
Revised 17.04.2024
Accepted 10.05.2024