

УДК 621.311.086.5:621.3.001

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., Э.С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, доц.,  
Р.А. ПАРХОМЕНКО, ст. преподаватель, А.А. ХАРИТОНОВ, ст. преподаватель  
Криворожский национальный университет

## ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ ШАХТНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

В статье приведены результаты исследований по оценке состояний процесса электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с применением методов «сжатия» информации. Описанные процедуры дают возможность в условиях неопределенности и слабой информативности наблюдаемых признаков, обуславливающих процесс электропотребления, наиболее полно использовать исходную статистическую информацию для оценок, адекватно описывающих состояния режимов электропотребления. Предложено описание режимов электрических нагрузок для электроприемников с неоднородным характером работы в виде многоуровневой аддитивной модели.

**Ключевые слова:** электроприемники, эффективность, электропотребление, неопределенность, воздействие

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Повышение эффективности использования электроэнергии на железорудных предприятиях неразрывно связано с проблемой реальности уровня оценки режимов электропотребления, что особенно актуально в силу специфики условий ведения горных работ [1 - 3]. В этой связи целесообразно выдвинуть следующие идеи. Направления, подлежащие исследованию:

Электропотребление горных предприятий зависит от большого числа факторов. Влияние факторов на процесс электропотребления (ЭП) имеет сложный и многообразный характер, описание которого в рамках как детерминистических, так и классических статических методов не всегда возможно в силу непредсказуемости условий, определяющих действие факторов. В этой связи можно констатировать, что потребление электрической энергии (ПЭЭ) железорудных предприятий формируется под влиянием факторов, предсказание воздействия которых является недостаточно достоверным. Большое число разнообразных факторов представляет определенные трудности в оценке их воздействия на ПЭЭ как в методологическом, так и технико-экономическом аспектах.

Информация о процессе ПЭЭ содержит разнообразные множества эмпирических данных и характеризует его многомерными случайными признаками. Значительное число признаков делает трудной задачу выявления связей между признаками. В этом случае требуется описание процесса ЭП меньшим числом обобщенных характеристик, которые отражают внутренние объективно существующие закономерности, не поддающиеся непосредственному наблюдению.

Отмеченные особенности приводят к необходимости применять при оценке состояний режимов ПЭЭ горных предприятий методы, позволяющие получать решения в условиях неполной информации при снижении размерности исходных данных («сжатие» информации) о изучаемом процессе [4]. В этом случае возникают задачи анализа данных об ЭП, решение которых основано на применении методов факторного анализа и установлении типологии изучаемых объектов.

**Анализ исследований и публикаций.** Оценка состояний процесса электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с применением методов «сжатия» информации РКЛ и МГК предполагает выявление существенных признаков, определяющих природу режимов электропотребления. Сущность указанных методов [4] состоит в том, что при помощи ортогональных преобразований находится наилучшая проекция совокупности точек наблюдения в пространстве меньшей размерности. При этом вновь получаемые векторы распределяются в преобразованном пространстве: в МГК - по критерию максимума дисперсии, в РКЛ - по критерию минимума среднеквадратической ошибки. Таким образом, РКЛ дает возможность представить наиболее устойчивое состояние системы, которому соответствует минимум среднеквадратической ошибки, а МГК позволяет меньшим числом векторов, чем исходное, описать максимум дисперсии системы, т.е. дать наиболее вероятные границы изменения исходной экспериментальной матрицы.

Как показывают исследования [4-6] значительное число технологических электроприемников горных предприятий формируют энергетические режимы, имеющие неоднородный (с точки зрения распределения вероятностей) характер. В этом случае распределения вероятностей значений признаков исходной статистической информации и преобразованной («сжатой») информации в процессах ПЭЭ имеют полимодальный характер. Это обстоятельство вносит определенные трудности при моделировании процессов ПЭЭ.

**Изложение материала и результаты.** Для применения методов «сжатия» исходная информация об ЭП [7] должна представляться в виде матрицы

$$X = [X_j] = \begin{bmatrix} X_{11} \dots & X_{1j} \dots & X_{1m} \\ X_{i1} \dots & X_{ij} \dots & X_{im} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{nj} & X_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[X_j]$  - вектор-строка, отражающий информацию об электропотреблении при  $i$ -м значении признака;  $X_{ij}$  - значение величины электропотребления  $i$ -го признака  $j$ -го измерения (объекта);  $i = \overline{1, n}$  - число значений признака;  $j = \overline{1, m}$  - число измерений (объектов).

В этом случае электропотребление допустимо характеризовать как  $n$ -мерный вектор.

При моделировании ПЭЭ с помощью РКЛ основными преобразованиями являются следующие.

В реальном ПЭЭ выделяются характеристические ортогональные (независимые) составляющие (представительные векторы), описывающие электропотребление в пространстве меньшей размерности при извлечении из результатов наблюдения максимума информации. Указанная процедура выполняется с помощью линейного преобразования системы координат исходного  $n$ -мерного вектора электропотребления  $X$  согласно уравнению:

$$X = A \cdot Y, \quad (2)$$

где  $A$  - матрица преобразования,  $A = \{a_{ij}\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $Y$  - представительный  $n$ -мерный вектор, описывающий процесс ЭП в пространстве новых переменных,

$$Y = \{Y_{ij}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}.$$

Матрица преобразования  $A$  находится по исходной матрице  $X$  и представляет собой  $n$  собственных векторов ковариационной матрицы  $K_x$

$$K_x = \begin{bmatrix} K_{11} \dots & K_{1j} \dots & K_{1m} \\ K_{i1} \dots & K_{ij} \dots & K_{im} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{nj} & K_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $K_{ij}$  - выборочные несмещенные оценки элементов ковариационной матрицы, которые определяются по выражению

$$K_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - \overline{X}_j)(X_{lj} - \overline{X}_l), \quad (4)$$

где  $\overline{X}_j, X_l$  - вторичные средние  $i$ -й и  $l$ -й компонент  $n$ -мерного вектора электропотребления  $X$ .

Собственные векторы  $U_i$  матрицы  $K_x$  находятся через собственные числа  $\lambda_{Ki}$  из уравнения

$$K_x \cdot U_i = \lambda_{Ki} \cdot U_i, \quad (5)$$

Собственные числа  $\lambda_{Ki}$  получаются в результате решения уравнения

$$K_x - \lambda_{Ki} \cdot I = 0, \quad (6)$$

где  $I$  - единичная матрица.

Для соблюдения условия ортонормирования необходимо выполнить нормировку собственных векторов, после чего получается матрица преобразования

$$A = [A] = \begin{bmatrix} A_{11} \dots & A_{1r} \dots & A_{1n} \\ X_{i1} \dots & X_{ir} \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{nr} & X_{nn} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

При выполнении ортонормированности представительный вектор в пространстве новых переменных определится матричным уравнением

$$Y = A^T X, \quad (8)$$

При этом выполняются следующие условия.

Представительные векторы  $Y_i$  некоррелированные, т.е. выполняется условие

$$M \{ (Y_{ij} - \bar{Y}_i) \cdot (Y_{ij} - \bar{Y}_l) \} = \begin{cases} \lambda_i & \text{при } l = i \\ 0 & \text{при } l \neq i \end{cases}, \quad (9)$$

Среднеквадратическая ошибка при использовании для представления вектора  $X$  только  $N$  первых представительных векторов  $Y_i$  ( $N < n$ ) минимальна

$$\mathcal{E}^{-2}(N)_{\min} = \sum_{i=N+1}^n \lambda_{Ki}, \quad (10)$$

Таким образом, для изучаемого процесса ПЭЭ модель «сжатой» информации имеет вид

$$X_{ij} = \sum_{r=0}^n a_{ir} \cdot Y_{rj}, \quad (11)$$

При моделировании процесса ПЭЭ с помощью МГК основными преобразованиями являются следующие

Стандартизируются значения матрицы исходных данных о процессе ЭП (1) и получают стандартизованную матрицу

$$Z = \{Z_{ij}\}, \quad (12)$$

Значения стандартизованной матрицы

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j}, \quad (13)$$

где  $\bar{X}_j$  - среднее значение по столбцу  $j$ ;  $\sigma_j$  - среднеквадратическое отклонение значений  $X$  в столбце  $j$ .

Новые переменные находятся как некоррелированные нормированные линейные комбинации исходных признаков. В матричной форме имеем

$$F = B^T \cdot Z, \quad (14)$$

где  $F$  - матрица новых переменных (главный компонент);  $F = \{f_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $B$  - матрица преобразования.

Матрица преобразования

$$B = A \cdot \lambda^{1/2}; \quad (15)$$

где  $A$  - ортогональная матрица в которой  $r$ -й столбец является  $r$ -м собственным вектором, соответствующим  $r$ -му, собственному числу корреляционной матрицы  $R_x$ ;  $\lambda$  - диагональная матрица, на диагонали которой находятся собственные значения  $\lambda_r$  корреляционной матрицы  $R_x$  вектора  $X$ .

Элементы в матрице  $\lambda$  расположены в порядке убывания

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0, \quad (16)$$

Новые переменные расположены в пространстве признаков в порядке убывания их дисперсий, т.е.

$$\sigma^2(f_1) \geq \sigma^2(f_2) \geq \dots \geq \sigma^2(f_n), \quad (17)$$

где  $f_1, f_2, \dots, f_n$  - соответственно первая, вторая,  $n$ -я главные компоненты.

Для изучаемого процесса ЭП модель «сжатой» информации будет иметь вид

$$X_{ij} = \sum_{r=1}^n b_{ir} \cdot f_{rj}, \quad (18)$$

где  $n$  - число главных компонент;  $f_{rj}$  - обеспечивающих вклад в общую дисперсию с достаточной задаваемой надежностью.

При аппроксимации векторов преобразования  $(A_r, B_r)$  и представительных векторов  $Y_r$  (главных компонент  $f_r$ ) аналитическими функциями получаем адекватные модели процесса ЭП

$$F_{Xij}(\gamma_a, \varphi_Y) = \sum_{r=1}^n \gamma_a \cdot r_i(T) \cdot Y_{Y,rj}, \quad (19)$$

где  $\gamma_a, \varphi_Y$  - аналитические функции, аппроксимирующие векторы  $A_r$  и  $Y_r$ , входящие соответственно в матрицы  $A$  и  $Y$ ;  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ .

Описанные процедуры дают возможность в условиях неопределенности и слабой информативности наблюдаемых признаков, обуславливающих процесс ЭП, наиболее полно использовать исходную статистическую информацию для оценок, адекватно описывающих состояния режимов ЭП.

В случае неоднородного энергетического режима работы электроприемников (при полимодальном распределении значений электрической нагрузки) моделирование процесса ПЭЭ целесообразно выполнять с выделением из всей области изменения нагрузки устойчивых уровней, около средних значений которых с определенной степенью рассеяния варьируются отдельные случайные значения нагрузки.

Для осуществления указанной процедуры целесообразно применить статистическую классификацию, основанную на выборочных наблюдениях и позволяющую привести множество наблюдаемых значений нагрузки в систему ранжированных уровней (классов).

Задача классификации электрических нагрузок на уровни распадается на две [ 5 ]: выделение числа и свойств классов в пространстве образов нагрузок; идентификация случайных значений нагрузок, т.е. отнесение их к одному из классов.

Для выделения из экспериментальных выборок классов необходимо осуществить генерацию гипотез с использованием кластерного анализа [ 6 ]. Выделение числа и свойства кластеров в пространстве изменения образов электрических нагрузок, представленных полимодальными выборками, связано с неопределенностью, так как кластеры недостаточно разнесены в пространстве. В этом случае генерацию гипотез целесообразно осуществить по следующей схеме.

По характеру распределения и числу мод выборки, характеризующей электрическую нагрузку, характеризующей электрическую нагрузку, устанавливается число кластеров. Для идентификации случайных значений нагрузок в качестве групповой меры близости принимается внутригрупповая сумма квадратов отклонений между каждым образом и средней по кластеру. Качество кластеризации обеспечивается минимизацией выбранной меры близости

$$Y = \sum_{i=1}^n \sum_{x \in P_i} \| \dot{X} - \dot{m}_i \|^2 = \min, \quad (20)$$

где  $n$  - число кластеров;  $P_i$  - множество образов, входящих в  $i$ -й кластер;  $X$  - вектор измерений электрической нагрузки;  $m_i$  - вектор выборочных средних для множества  $P_i$ .

$$\dot{m}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in P_i} \dot{X}, \quad (21)$$

где  $n_i$  - количество образов, входящих в множество  $P_i$ .

Кластеризация электрических нагрузок по приведенной схеме позволяет получить множества устойчивых уровней нагрузки и времени их действия  $t_n$

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \quad (22)$$

$$t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad (23)$$

Определение режимов ЭП в виде выражений (22) и (23) меняет традиционное представление о характере распределения электрических нагрузок в виде нормального, положенного в основу расчетных методов определения электрических нагрузок [8,9].

В связи с нетрадиционным представлением режимов ЭП требуется рассмотреть общие выражения для определения величин, используемых в расчетах электрических нагрузок.

Для расхода электроэнергии за рассматриваемый период (например, смену) с учетом полученных множеств можно записать

$$P_C \cdot t_{CM} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i, \quad (24)$$

где  $P_C$  - средняя нагрузка за смену  $t_{CM}$ .

Выполняя почленное деление левой и правой частей (24) на  $P_{НОМ} \cdot t_{CM}$ , а также вводя обозначения:  $P_C^* = P_C / P_{НОМ}$ ;  $P_i^* = P_i / P_{НОМ}$ ;  $t_i^* = t_i / t_{CM}$ ;  $K_r = P_i^* / P_i$ , ( $r=2,3, \dots, n$ ) и принимая за максимальный уровень нагрузки  $P_1^*$ , имеем

$$P_C^* = P_1^* \cdot t_1^* + K_2 \cdot P_1^* \left(1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n t_i^*\right) + \dots + K_n \cdot P_1^* \left(1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n t_i^*\right)$$

или

$$P_C^* = P_1^* \cdot \left[ t_1^* + \sum_{r=2}^n K_r \cdot \left(1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n t_i^*\right) \right], \quad (25)$$

Полученное выражение (25) позволяет дать описание режимов ЭН для электроприемников с неоднородным характером работы в виде многоуровневой аддитивной модели.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Описанные процедуры позволяют реализовать основные идеи о процессе ПЭЭ, принимаемые при исследовании и оценке его состояний [10 - 11].

В указанном аспекте оценка состояния процесса ЭП при всем многообразии моделей анализа опирается на положение, заключающееся в том, что при обследовании или эксперименте, когда эмпирический материал содержит большое число параметров, многие из них объединены корреляционными связями между собой. Это объясняется тем, что наблюдаемые «внешние» параметры лишь косвенно характеризуют процесс ЭП. Наряду с большим числом «внешних» параметров (факторов) существует небольшое число «внутренних» («существенных») параметров. Эти «внутренние» параметры трудно или невозможно измерить, но они определяют поведение «внешних» параметров. Нахождение этих гипотетических существенных параметров и является целью анализа состояния процесса ПЭЭ.

Основываясь на вышеизложенных позициях, можно выделить различные множества (параметров), обуславливающих процесс ПЭЭ. К числу этих множеств относятся группы факторов горно-геологического, горно-технологического, климато-метеорологического, электроэнергетического, организационного характера.

Такие параметры (факторы) горно-технологической группы, как глубина залегания, размеры месторождений, температура горных массивов, вид технологии, параметры систем вскрытия и разработки, типы применяемых машин и оборудования и др., влияют на электроэнергоемкость продукции. На процесс ПЭЭ влияют и времена года. Электроэнергетические факторы – структурные параметры электрических схем, число, мощность, КПД электроприемников и др. – обуславливают формирование режимов электрических нагрузок. Организационные и эксплуатационные факторы обуславливают степень использования электроприемников, уровень повышенных потерь электроэнергии из-за ухудшения характеристик электрооборудования, машин и механизмов.

#### Список литературы

1. Розен В.П. Оцінювання енергоефективності електроспоживання вугільних шахт [Текст] / В.П. Розен, Л.В. Давиденко, В.І. Волинець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: Матеріали IV-ої міжнародної науково-технічної конференції – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2012. – С. 130 – 132.
2. Пархоменко Р.А. К вопросу оценки процесса электропотребления горнорудных предприятий в условиях неопределенности и неполноты информации [Текст] / Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая, М.А. Баулина // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник матеріалів конференції Міжнародної 3 науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С.190-191.

3. Messner S. MESSAGE- MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively / S. Messner, L. Schattenholzer // Energy. – 2000. – N 25. – P. 267 – 285.
4. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев // М.: Недра, 1985 - 232 с.
5. Олейников В.К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях / В.К. Олейников // М.: Недра, 1983. – 192 с.
6. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин // М.: Финансы и статистика, 1989.— 607 с.
7. Parkchomenko R. Dynamics appraisal of electrical energy consumption process of iron ore mines in conditions of indeterminacy and insufficiency of information [Electronic source] / R.O. Parkchomenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 332–335. Access mode: http: // www.metaljournal.com.ua/assets/MMI\_2014\_6/MMI\_2015\_2/051-Parchomenko.pdf
8. Синчук И.О. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко // под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.
9. Синчук О.Н. Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участковых подстанций железорудных шахт / О.Н. Синчук, С.Н. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. - Кіровоград, 2012. - Випуск 25, частина II. - С.248-254.
10. Розен В.П. Моделирование энергетических режимов энергоёмких потребителей железорудных шахт / В.П. Розен, Э.С. Гузов, Р.О. Пархоменко // Научно-технический сборник «Гірничий вісник». Випуск №97. - Кривий Ріг: 2014. – С.176-180.
11. Пархоменко Р.О. Підвищення ефективності електропостачання у шахтних мережах як один із шляхів підвищення конкурентоспроможності продукції / Р.О. Пархоменко, О.В. Аніськов // Збірник тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ - REMS'15»/ Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2015.- С.71-72.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16

УДК 622: 621.31

В.Н. ФАЦИЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., НИТУ МИСиС  
С.Н. РЕШЕТНЯК, канд. техн. наук, доц. НИТУ МИСиС

## ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРУШЕНИИ ГОРНОГО МАССИВА

В работе представлено обоснование исследований электромеханических резонансных процессов протекающих при процессе разрушения горного массива на примере проходческого комбайна. До недавнего времени все резонансные явления в электромеханических системах горных машин являлись крайне вредными, и разрабатывалось достаточно большое количество способов по их гашению. Идея работы заключается в использовании энергии резонансных явления на разрушение горного массива. Эта проблема актуальна как для открытых, так и для подземных горных работ. Использование резонансных явлений в электромеханической системе исполнительного органа горного оборудования позволит разработать оборудования и значительно увеличить скорость разрушения горного массива, тем самым повысить энергоэффективность оборудования, что значительно скажется на себестоимости производимой продукции.

Однако при работе горного оборудования в режиме контролируемого резонанса, необходимо достаточно жестко контролировать эти режимы ввиду того что, неконтрольный резонансный режим приводит к разрушению электромеханической системы горного оборудования, ремонт которого является достаточно затратным.

Решение представленной задачи позволит снизить себестоимость производства продукции, за счет снижения затрат на потребление электрической энергии, и повышения срока службы отдельных элементов конструкции проходческого комбайна.

**Ключевые слова:** электропривод, резонансный режим работы, горные машины, электромеханическая система.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Проблемы разрушения горного массива была и остается одной из важнейших проблем добычи полезного ископаемого как открытым способом, так и подземным способом. В настоящее время существует несколько способов разрушения горного массива, таких как: взрывной способ; вибрационный способ; способ гидроструйки; электротермический способ; шарошечный способ; а также ряд комбинированных способов [1].

**Анализ исследований и публикаций.** Основные приоритетные направления научных исследований в области разрушения массива горных пород являются: