

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, Р. А. Пархоменко**

Криворожский национальный университет

ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: speet@ukr.net

Приведён анализ известных и применяемых в практике проектирования методов расчёта электрических нагрузок систем электроснабжения железорудных и других видов промышленных предприятий. Показано, что предложенные методы не позволяют с требуемым уровнем адекватности определить ожидаемые электрические нагрузки предприятий, а коэффициенты, рекомендуемые для использования в этих методах, устарели, не соответствуют реалиям и вообще трудно определяемы. Оценено качество и установлен уровень расхождения значенных параметров систем электроснабжения, получаемых расчётным путём и реальными. Предложена методика расчёта, исключающая недостатки анализируемых методов.

**Ключевые слова:** электрические нагрузки, методы расчёта, системы электроснабжения.

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ І МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

**О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, Р. О. Пархоменко**

Криворізький національний університет

вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: speet@ukr.net

Наведений аналіз відомих і вживаних у практиці проектування методів розрахунку електричних навантажень систем електропостачання залізорудних та інших видів промислових підприємств. Показано, що запропоновані багато десятиліть тому методи не дозволяють з необхідним рівнем достовірності визначити очікувані електричні навантаження підприємств, коефіцієнти, що рекомендуються для використання в цих методах застарілі, не відповідають реаліям і взагалі є важкими для визначення. Оцінена якість і встановлений рівень розбіжності отримуваних розрахунковим шляхом і реальних значень параметрів систем електропостачання. Запропонована методика розрахунку, що виключає недоліки аналізованих методів.

**Ключові слова:** електричні навантаження, методи розрахунку, системи електропостачання.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Ожидаемое и остро необходимое для Украины повышение технико-экономических показателей добычи железной руды, как сырья для металлургической отрасли – основного источника формирования ВВП Украины, напрямую связано с проблемой повышения эффективности систем электроснабжения соответствующих горнорудных предприятий, в том числе с подземными видами добычи полезных ископаемых [1].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Известно немало научных трудов, в которых рассматривается проблема расчёта электрических нагрузок для промышленных и горных предприятий [2–5]. Эти и ряд других исследований действительно заложили основы [2], которые впоследствии были развиты и развиваются в плоскости теории расчёта электрических нагрузок [4, 5]. Однако утверждать тот факт, что эта теория расчётов даёт реальный, достаточно близкий к истине результат, будет некорректно, исходя из практики конструирования схем электроснабжения анализируемых предприятий и выбора параметров их слагаемых элементов.

Эксплуатируемые в настоящее время системы электроснабжения горнорудных предприятий вообще, а железорудных шахт в частности, характеризуются, прежде всего, значительным завышением установленных мощностей силовых трансформаторов на всех без исключения подстанциях и, как следствие, завышенными параметрами применяемой

коммутиционной аппаратуры и сечением кабелей, питающих электрические потребители. Такое положение влечёт за собой череду одиозных фактов от потерь электрической энергии до неработоспособности устройств защитного отключения. Сложившееся является прямым следствием как объективных причин (снижение объёмов производства и естественным при этом снижением электропотребления), так и превентивно завышенными расчётными значениями параметров – электрических нагрузок. А, как известно, именно по расчётным нагрузкам выбираются все элементы системы электроснабжения: трансформаторы, линии электропередач, выключатели и другое оборудование [2, 3]. При этом даже небольшая ошибка при расчете нагрузок влечет за собой неправильный выбор всего электрооборудования системы электроснабжения со всеми вытекающими последствиями. Не случайно вопросу расчета электрических нагрузок уделяется особое внимание вот уже на протяжении десятков лет [2–5].

Вместе с тем, пока задачу расчета электрических нагрузок нельзя считать решенной, т.к. имеются значительные и недопустимые расхождения между расчетными и действительными нагрузками. Причиной такого положения является несовершенство, как самих методов расчёта, так и некорректности используемых нормативных коэффициентов [4].

В условиях горных, как впрочем, и других промышленных предприятий, расчет электрических

нагрузок производится, как правило, методами коэффициента спроса и упорядоченных диаграмм [2–5]. Рассмотрим логику построения и особенности этих методик.

Наиболее простым по тактике строения является метод коэффициента спроса, при этом максимальная или расчетная активная нагрузка определяется как

$$P_{\text{макс}} = \sum_1^n P_{\text{ном}} \cdot \kappa_c, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность группы электроприемников с одинаковым режимом работы;  $\kappa_c$  – соответствующий коэффициент спроса для группы электроприемников с одинаковым режимом работы;  $n$  – количество групп электроприемников, т.е. расчет нагрузок ведется для групп потребителей с однотипным режимом работы, хотя реально мы имеем технологические группы потребителей с различными режимами работы: потребители цехов, технологических участков, предприятий в целом. Другими словами, уже априори очевидно, что логика построения методики расчета данным методом не соответствует даже структуре построения систем электроснабжения, не говоря о реальной оценке режимов функционирования её электрических приёмников. Определение соответствующих коэффициентов спроса в производственных условиях необходимо искусственно разделить потребители на группы с одинаковым режимом работы и знать реальные максимальные нагрузки этих групп потребителей, для чего требуется специальные средства измерительной техники и большой объем работ. Не случайно значения коэффициентов спроса – квинтэссенция этого метода не обновлялись свыше 50 лет, и, конечно, результаты расчетов электрических нагрузок по этому методу далеки от реальных.

Другим недостатком метода коэффициента спроса является отсутствие механизма учета количества потребителей, хотя известно, что, чем больше потребителей, тем меньше вероятность их одновременной работы и меньше значение электрических нагрузок. Для устранения этого отрицательного момента, т.е. учета количества потребителей, может вводиться еще один коэффициент – коэффициент совмещения максимумов групп потребителей, но его значения принимаются довольно произвольно [4].

Отмеченные недостатки метода коэффициента спроса отчасти минимизируются в методе упорядоченных диаграмм, который рекомендован нормативными документами для расчета электрических нагрузок промышленных предприятий [3, 4]. В разрезе этого метода расчет нагрузок производится в два этапа: сначала определяются средние нагрузки, затем – от средних переходят к максимальным.

Средние активные нагрузки определяются:

$$P_{\text{ср}} = \sum_1^n P_{\text{ном}} \cdot \kappa_u, \quad (2)$$

где  $\kappa_u$  – коэффициент использования для группы потребителей с одинаковым режимом работы в наиболее загруженную смену.

Однако и здесь присутствуют те же неприятности, что и с коэффициентом спроса – потребители разделяются на группы с одинаковым режимом работы, хотя реальные схемы электроснабжения обеспечивают питание технологических групп потребителей с различными режимами работы. Поэтому проверка правильности и уточнение расчетных коэффициентов для использования в данном методе в условиях эксплуатации также проблематична.

Максимальные нагрузки –

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{ср}} \cdot \kappa_{\text{макс}}, \quad (3)$$

где  $\kappa_{\text{макс}}$  – коэффициент максимума, определяемый по упорядоченным диаграммам в функции общего коэффициента использования и эквивалентного числа потребителей.

Следует заметить, что упорядоченные диаграммы построены для случая, когда потребление носит случайный характер и имеет нормальный закон распределения, и при этом потребители работают независимо друг от друга.

Применительно к промышленным предприятиям это не согласуется с реальностью – потребление энергии обусловлено производственной программой, потребители почти всегда связаны определенными технологическими процессами.

В связи с низкой точностью в метод упорядоченных диаграмм рядом авторов внесены корректуры в методику. Так, в [4, 5] предложено для потребителей с постоянным графиком нагрузки применить коэффициент максимума  $\kappa_u=1$  и считать для этих потребителей максимальную нагрузку равной средней, для других же потребителей с переменным графиком нагрузки коэффициент максимума определяется по упорядоченным диаграммам – таким образом вносится ещё дополнительное деление потребителей по режимам их работы.

В работе [4] предложено использовать комплексный метод расчёта электрических нагрузок, который заключается в использовании одновременно нескольких методов расчёта, а также информационную базу аналогов. Следует отметить, что использование информационной базы аналогов полезно при применении любых методов расчёта нагрузок, а применение одновременно нескольких методов не является новшеством и не упрощает задачу.

Напрашивается вывод о том, что и методики расчета электрических нагрузок и соответствующие расчетные коэффициенты должны быть ориентированы не на учет отдельных потребителей с их режимами работы, а на общую оценку электропотребления технологических групп потребителей, режимы работы которых взаимосвязаны и обусловлены технологическими процессами.

Это отвечает структуре реальных систем электроснабжения, дает возможность проверять правильность расчетов и корректировать расчетные

коэффициенты, используя штатные измерительные приборы.

В этом плане представляют интерес статистические методы расчета, в частности вариант, рассмотренный в [2], где максимальная нагрузка определяется как

$$P_{\max} = \left( \kappa_u + \frac{\beta \sigma_*}{\sqrt{n_э}} \right) \cdot \sum_1^n P_H, \quad (4)$$

где  $\sigma_*$  – относительное среднеквадратичное отклонение одного эффективного потребителя;  $\beta$  – кратность меры рассеяния, принимаемая обычно в пределах 1,5–2,5;  $n_э$  – эффективное число потребителей.

В приведенной формуле (4) выражение в скобках не что иное, как коэффициент спроса:

$$\kappa_c = \kappa_u + \frac{\beta \sigma_*}{\sqrt{n_э}}. \quad (5)$$

Но использовать в проектной практике коэффициент спроса в таком виде также проблематично, т.к. данные о среднеквадратичных отклонениях отсутствуют, и определение их в производственных условиях представляет сложный процесс.

Попытаемся упростить задачу. Если принять во внимание известное положение [3] о том, что для единичного электроприемника можно принять  $\kappa_c = 1$ , то это положение будет иметь место при  $\beta \sigma_* = 1 - \kappa_u$ , тогда можно записать:

$$\kappa_c = \kappa_u + \frac{1 - \kappa_u}{\sqrt{n_э}}. \quad (6)$$

Эта на вид простая формула достаточно точно выражает довольно сложную логику зависимостей параметров электропотребления:

– устранен главный недостаток метода коэффициента спроса – учтено влияние числа потребителей;

– при увеличении числа потребителей  $n_э \rightarrow \infty$ , коэффициент спроса  $\kappa_c \rightarrow \kappa_u$ , а максимальная мощность  $P_{\max} \rightarrow P_{cp}$ ;

– при уменьшении числа потребителей  $n_э \rightarrow 1$ , коэффициент спроса  $\kappa_c \rightarrow 1$ , а максимальная мощность  $P_{\max} \rightarrow P_{ном}$ .

При этом для выполнения расчетов электрических нагрузок по предлагаемой обобщенной методике не требуется ни упорядоченных диаграмм, ни среднеквадратичных отклонений, ни коэффициента использования по каждому виду оборудования. Требуется лишь минимальный объем исходной информации: общие коэффициенты использования для технологических групп потребителей, а также количество и режимы работы.

Тогда эффективное число потребителей вычисляется по известной формуле [2–5]:

$$n_э = \frac{\left( \sum_1^n P_{ном} \right)^2}{\sum_1^n P_{ном}^2}. \quad (7)$$

В любом случае при определении эффективного числа потребителей необходимо учитывать, что группа двигателей, работающих в технологической установке одновременно, рассматривается как один двигатель суммарной мощности. С другой стороны, не следует учитывать резервные и маломощные потребители.

При количестве потребителей более 100 можно считать  $\kappa_c = \kappa_u$  [4]. Поэтому при выполнении расчетов электрических нагрузок в сетях 6–10 кВ в качестве расчетной следует принимать среднюю максимальную нагрузку:

$$P_{\max} = \sum_1^n P_{cp} = \sum_1^n P_{ном} \cdot \kappa_u. \quad (8)$$

Реактивная мощность определяется подобно методу упорядоченных диаграмм [2]:

$$Q = \sum_1^n P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (9)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент мощности для соответствующих групп потребителей.

Для уточнения предлагаемой обобщенной методики и определения конкретных значений расчетных коэффициентов для целей проектирования, авторами был проведен комплекс экспериментальных исследований электрических нагрузок добычных участков железорудных шахт ПАО «Криворожский железорудный комбинат».

В ходе исследований регистрировались электрическими счетчиками и анализировались суточные графики нагрузки на участковых трансформаторных подстанциях трех шахт.

На рис. 1 приведен один из полученных суточных графиков нагрузки трансформатора участковой подстанции, питающего добычный и подготовительный участок с суммарной мощностью потребителей  $\sum_1^n P_{ном} = 215$  кВт.

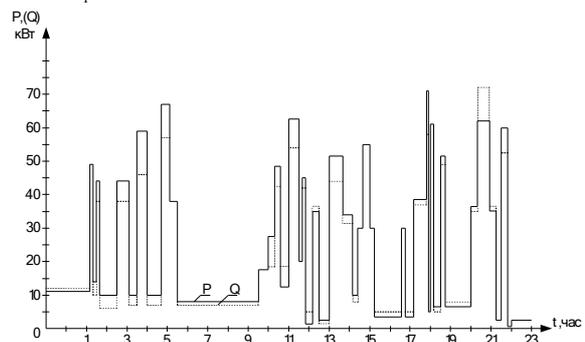


Рисунок 1 – Суточный график нагрузки трансформатора участковой подстанции

Из графика (рис. 1) как одного из полученных видна трехменная работа потребителей с резко переменной нагрузкой. В отдельные интервалы времени реактивная мощность (штриховая линия) превышает активную, что свидетельствует о кратковременной перегрузке оборудования. Средний коэффициент мощности  $tg\varphi = 0,9$ .

В ходе экспериментов на основании обработки результатов полученных данных (около 20-ти графиков нагрузки) определены следующие характеристики: максимальные нагрузки и их продолжительность, средние и среднеквадратичные нагрузки, коэффициенты формы, заполнения, спроса, использования и коэффициенты мощности.

Анализ показал, что загрузка трансформаторов на участковых подстанциях отечественных железорудных шахт менее 30 % их установленной мощности. Это ещё раз убедительно показывает неточность применяемых методов расчета электрических нагрузок и расчетных коэффициентов.

Обработка экспериментальных данных и определение статистических характеристик суточных графиков нагрузки производились с использованием известных методов математической статистики, обеспечивающих необходимую точность и достоверность расчетов при доверительной вероятности 0,98 [2].

Согласно экспериментальным данным групповой коэффициент использования в различных условиях изменяется в пределах 0,1–0,2. В качестве расчетной величины принимается наибольшее значение  $\kappa_u = 0,2$ .

При выполнении расчетов следует учесть, что коэффициент загрузки единичного потребителя всегда меньше 1 и практически составляет 0,7–0,9. Это позволяет скорректировать выражение коэффициента спроса (6) и представить его в виде

$$\kappa_c = \kappa_u + \frac{0,8 - \kappa_u}{\sqrt{n_s}} \quad (10)$$

Если учесть реальное максимальное значение коэффициента использования  $\kappa_u = 0,2$ , то для расчета электрических нагрузок добычных участков железорудных шахт удобно использовать выражение коэффициента спроса:

$$\kappa_c = 0,2 + 0,6 \frac{1}{\sqrt{n_s}} \quad (11)$$

В процессе экспериментальных исследований определялся также коэффициент мощности  $tg\varphi$ , который для различных участков изменялся в пределах 0,8–0,9. В качестве расчетной величины принято максимальное значение  $tg\varphi = 0,9$ .

Для оценки различных методик расчета электрических нагрузок выполнены расчеты методом упорядоченных диаграмм и предлагаемым обобщенным методом.

По результатам расчета значения максимальной расчетной мощности, полученные обобщенным методом, на 30–40 % меньше, чем методом упорядоченных диаграмм, и значительно ближе к реально существующим значениям.

Следует отметить еще одну деталь, связанную с проектированием: проектные значения суммарной установленной мощности оборудования существенно превышают фактические – на рассматриваемых участках в 1,6 раза. С учетом неточности расчетов получается, что трансформаторная мощность завышена примерно вдвое, что и наблюдается в действительности.

Предлагаемая обобщенная методика расчета электрических нагрузок является универсальной и приемлемой для любых производств и систем электропотребления.

Для использования методики необходимо знать значения групповых коэффициентов использования в наиболее загруженную смену. Эти значения можно определить расчетным путем, но гораздо точнее измерить эти значения на действующих предприятиях. При ограниченном количестве экспериментов для учета возможных отклонений рекомендуется максимальные измеренные значения коэффициента использования  $\kappa_{u,изм}$  увеличивать на 0,05, т.е. расчетное значение коэффициента использования:

$$\kappa_u = \kappa_{u,изм} + 0,05 \quad (12)$$

Существующие сегодня системы энергоучета в сетях электроснабжения позволяют без видимых помех эффективно провести необходимые измерения наибольших средних нагрузок для определения реальных коэффициентов использования для различных технологических групп потребителей, цехов и предприятий в целом. Это позволит существенно повысить точность расчетов и снизить затраты на электроснабжение.

#### ВЫВОДЫ.

1. Сформирован новый подход к расчету электрических нагрузок технологических групп потребителей, отличающийся от известных отсутствием искусственного разделения их по режимам работы, что соответствует реальной структуре систем электроснабжения горнорудных и ряда других промышленных предприятий.

2. По результатам сравнительных расчетов значения расчетной мощности, полученные обобщенным методом, на 30–40 % меньше, чем другими применяемыми методами и значительно ближе к реально существующим значениям, а загрузка силовых трансформаторов участковых подстанций составляет лишь около 30 %.

3. Оценено, что общая трансформаторная мощность на подземных подстанциях шахт может быть уменьшена в 1,5–2 раза. Установлено, что наиболее целесообразная мощность трансформаторов для участковых подстанций железорудных шахт составляет 250 кВА.

4. Предложен новый обобщенный метод расчета электрических нагрузок на основе общего коэффициента использования для технологической группы потребителей, который может определяться с требуемой высокой точностью на действующих предприятиях, используя имеющиеся средства энергоучета. Предполагаемая обобщенная методика расчета электрических нагрузок является универсальной и приемлемой для любых производств и систем электропотребления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009–2011 гг. «Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС

2004–2011 гг.» / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011. – 329 с.

2. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

3. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. и др. – М.: Энергия, 1990. – 285 с.

4. Кудрин Б.И. Электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Интермет, 2007. – 50 с.

5. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основы электропостачання. – Кировоград: КНТУ, 2010. – 211 с.

### IMPROVEMENT OF CALCULATION METHODS OF ELECTRIC LOADINGS FOR PLANNING AND MODERNIZATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS AT IRON-ORE ENTERPRISES

**O. Sinchuk, E. Guzov, R. Parhomenko**

Kyryvi Rih National University

vul. XXII Partysjezda, 11, Kryvyi Rig, 50027, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

The analysis of well-known calculation methods of electric loadings that are in practical use when planning power supply systems of iron-ore manufactories and other types of industrial enterprises is presented in the article. It is shown that methods described do not allow defining of electric loading of enterprises with the accuracy level required and the coefficients recommended for these methods practical use do not meet the up-to-date standards and their determination is quite difficult at all. The reliability of the parameters obtained is defined and the level of divergence between the calculated parameters of power supply systems and the real values of these parameters is determined. The methodology of electric loading calculation that eliminates the shortcomings of the methods considered is offered.

**Key words:** electric loadings, calculation methods, power supply systems.

#### REFERENCES

1. Babets E.K., Shtanko L.A., Salganik V.A. et al. *Sbornik tehniko-ekonomicheskikh pokazatelei gornodobyvauschikh predpriyatii Ukrainy v 2009–2011 godakh* [Reference book of technical and economic indexes of mining enterprises of Ukraine, 2009–2011]. – Kryvyi Rig: Vydavnychiy dim, 2011. – 329 p. [in Russian]

2. Fedorov A.A. *Osnovy energosberezheniya promyshlennykh predpriyatii* [Fundamentals of power supply of industrial enterprises]. – Moscow: Energiya, 1972. – 321 p. [in Russian]

3. *Spravochnik po proektirovaniu elektrosnabzheniya* [Reference book on planning of power supply] (Under a release of Baribin Y.G. et al.). – Moscow: Energiya, 1990. – 285 p. [in Russian]

4. Kudrin B. I. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatii* [Power supplying of industrial enterprises]. – Moscow: Internet, 2007. – 501 p. [in Russian]

5. Shkrabets F.P., Pleshkov P.G. *Osnovy elektropostachannia* [Fundamentals of power supply]. – Kyrovograd: KNTU, 2010. – 211 p. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 26.12.12.