

УДК 621.315.052.7 – 621.395.14

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., Э.С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, доц.,  
Р.А. ПАРХОМЕНКО, старший преподаватель  
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УЧАСТКОВЫМИ ПониЗИТЕЛЬНЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ

В работе получены реальные графики электрических нагрузок УПП железорудных шахт Криворожского железорудного бассейна с целью определения тактики оценки их реальных максимальных и средних значений.

Ключевые слова: участковые подстанции, трансформаторы, графики нагрузок.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Участковые пониженные подстанции (УПП) питают около 40% подземных потребителей электрической энергии (ЭЭ) железорудных отечественных шахт, поэтому анализ процесса потребления ЭЭ на этом уровне общей структуры электроснабжения является задачей важной [1,2]. При всем многообразии применяющихся систем разработки подземных ископаемых основным видом доставки руды до погрузочных люков является скреперная. Системы разработки с вибровыпуском применяются реже, а потребление ЭЭ в этих системах заведомо меньше, чем при скреперной доставке. Поэтому основное внимание было уделено исследованию электропотребления горных участков, использующих скреперную доставку.

**Анализ исследований и публикаций.** Проведенный анализ показал, что на добычных участках для доставки руды могут применяться скреперные лебедки с асинхронными электрическими двигателями мощностью от 30 до 100 кВт. Однако в подавляющем большинстве случаев используются скреперные лебедки ЛС-30 мощностью 30 кВт, в наибольшей степени удовлетворяющие условиям ведения горных работ, и широко применяемые как на добычных, так и на подготовительных работах.

Одновременно с добычными работами в блоке ведутся подготовительные работы, проходятся новые штреки скреперования. Для уборки породы используются скреперные лебедки, количество которых того же порядка, что и на добычных работах, а в начальный период эксплуатации блока даже больше. Скреперные лебедки подготовительных работ получают питание от той же сети, что и лебедки добычных работ. Очевидно, эти нагрузки должны учитываться совместно как общая суммарная мощность скреперных лебедок в блоках.

Погрузка руды в вагонетки производится вибролюками с электрическими двигателями мощностью 10-14 кВт. Независимо от общего количества люков в заезде, одновременно включается, как правило, один, продолжительность включения которого не превышает 0,5.

Вентиляторы местного проветривания на добычных участках используются редко. Обычно проветривание производится за счет общешахтной депрессии или пневматическими эжекторами. Электрическая энергия потребляется также освещением, сварочными трансформаторами, буровыми станками, электрическими чайниками, которые не оказывают существенного влияния на максимальные загрузки. Всё это составляет общую суммарную электрическую нагрузку УПП железорудных шахт.

**Постановка задания.** Целью работы является получение реальных графиков электрических нагрузок УПП железорудных шахт Криворожского железорудного бассейна и определение тактики оценки их реальных максимальных и средних значений.

**Изложение материала и результаты.** С целью достижения требуемой реальности и достоверности при построении электрических нагрузок УПП шахт Криворожского железорудного бассейна на протяжении ряда лет проводились экспериментальные исследования. Для этого был разработан измерительный комплект аппаратуры, который позволял регистрировать потребление активной и реактивной энергии в функции времени. Всего было получено более 500-т показаний различных УПП ряда шахт. По данным таблиц были построены фактические графики нагрузок участков и трансформаторов и определены характеристики графиков нагрузки: максимальные нагрузки, продолжительность максимальных нагрузок, средние нагрузки, среднеквадратичные нагрузки, коэффициенты заполнения графиков нагрузки, коэффициенты мощ-

ности, удельные расходы электроэнергии и другие представляющие интерес величины.

Для иллюстрации величины и характера нагрузок построены суточные графики нагрузки трансформаторов и некоторых участков за наиболее загруженные сутки (рис. 1–10), а в таблице 1 приведены некоторые характеристики приведенных суточных графиков нагрузок.

Анализ приведенных графиков нагрузки показывает, что реально используется лишь около 30% трансформаторной мощности, предусмотренной на подстанциях, в том числе на УПП.

В то же время коэффициент формы графиков находится в пределах 1,12-1,5, что говорит о большой неравномерности нагрузки. А коэффициент заполнения суточного графика нагрузки изменяется в пределах 0,27-0,56, продолжительность максимальной нагрузки 4-8 час. В зависимости от сочетания этих величин по диаграмме нагрузочной способности [3] может быть определена величина допустимой перегрузки трансформатора сверх номинальной мощности. При наихудшем сочетании, а именно - коэффициенте заполнения графика нагрузки 0,6 и длительности перегрузки 8 часов, допустимая перегрузка составляет 15%.

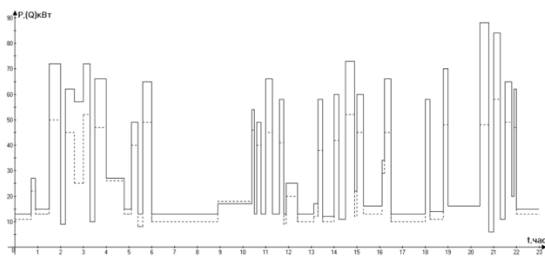


Рис. 1. Графики нагрузки трансформатора 1 УПП – 3 ш. Артём – 1-

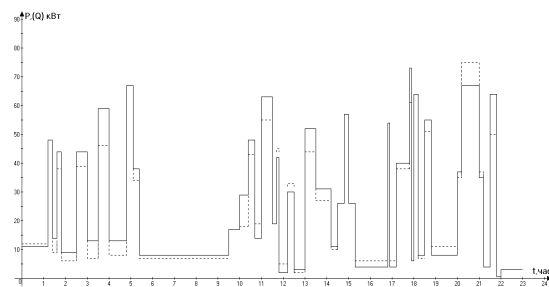


Рис. 2. Графики нагрузки трансформатора 2 УПП – 3 ш. Артём – 1

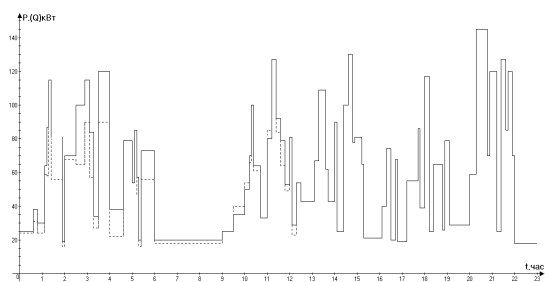


Рис. 3. Графики нагрузки УПП-3 ш. Артём-1

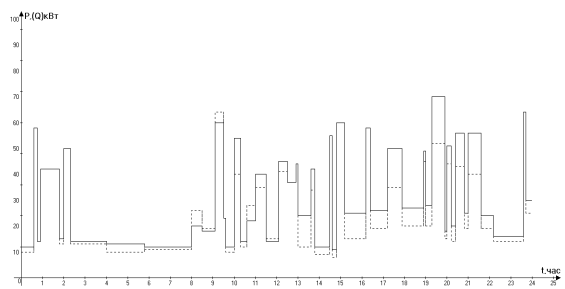


Рис. 4. Графики нагрузки трансформатора 1 УПП-5 ш. Артём-1

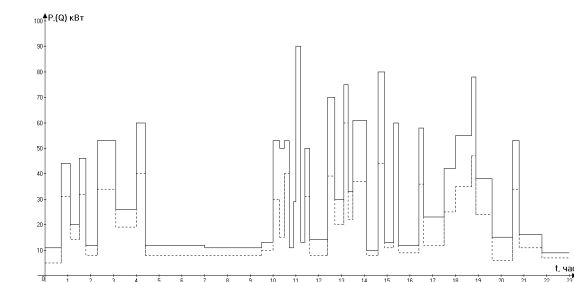


Рис. 5. Графики нагрузки трансформатора 2 УПП – 5 ш. Артём – 1-

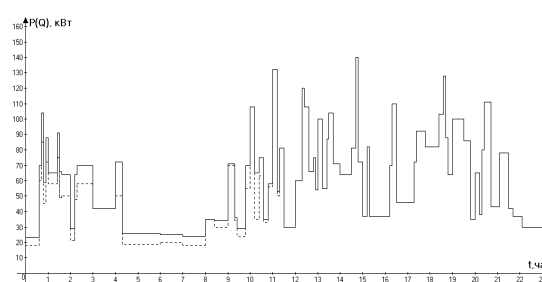


Рис. 6. Графики нагрузки трансформатора 2 УПП – 5 ш. Артём – 1

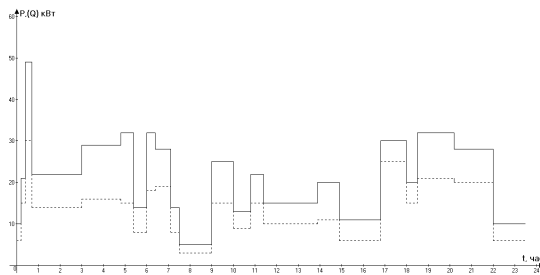


Рис. 7. График нагрузки орта 7 ш. Центральная

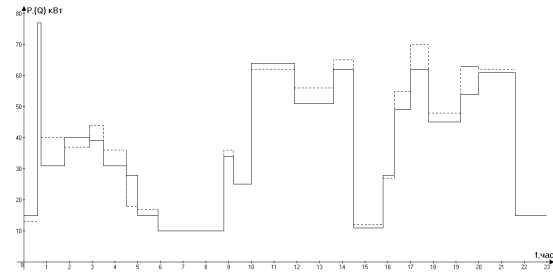


Рис. 8. График нагрузки трансформатора 3 УПП – 10 ш. Саксагань

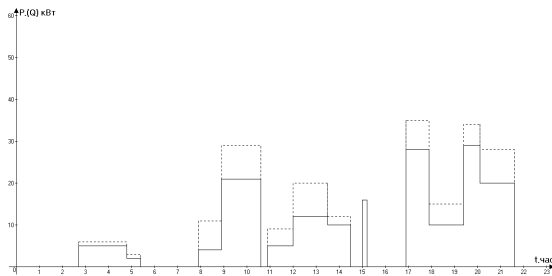


Рис. 9. График нагрузки трансформатора 2 УПП – 10 ш. Саксагань

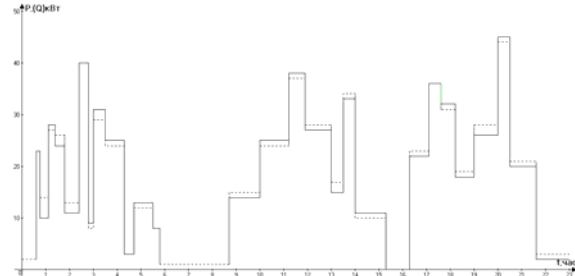


Рис. 10. График нагрузки орта 209 ш. Саксагань

Для определения основных исходных данных, необходимых для проектирования или реконструкции УПП, было обработано около 50 регистрограмм суточных графиков нагрузок трансформаторов четырех подстанций, снятых на шахтах «Артем», «Центральная» и «Саксагань». Обработка экспериментальных данных и определение статистических характеристик суточных графиков нагрузок производились с использованием известных методов математической статистики, обеспечивающих точность и достоверность расчётов.

Таблица 1

Характеристика графиков нагрузки рис. 1 – 10

№ рис.	Наименование	Средняя мощность, $P_{cp}$ , кВт	Средне-квадратичная мощность, $P_{ср.кв.}$ , кВт	Коэф. формы $K_{\phi} = \frac{P_{ср.кв.}}{P_{ср.}}$	Максимальная 30-минутная мощность, $P_{max}$ , кВт	Коэф. заполнения суточного графика $K_{з.п.} = \frac{P_{ср.}}{P_{max}}$
ш. Артём						
1	Тр-р 1 УПП – 3	27	37,1	1,37	68,3	0,4
2	Тр-р 2 УПП - 3	21,1	29,3	1,39	67,6	0,31
3	Нагрузка УПП - 3	48,1	63	1,3	133	0,36
4	Тр-р 1 УПП - 5	26,4	32,4	1,23	70,3	0,37
5	Тр-р 2 УПП - 5	26,4	33,8	1,28	67,5	0,39
6	Нагрузка УПП - 5	52,8	70,1	1,33	97,5	0,54
ш. Центральная						
7	Орт 7	20,4	23,9	1,17	43,9	0,46
ш. Саксагань						
8	Тр-р 3 УПП - 10	32,8	36,9	1,12	58,8	0,56
9	Тр-р 2 УПП - 10	7	10,7	1,5	26,2	1,27
10	Орт 209	14,9	19,4	1,3	44,1	0,34

За период измерений определялись следующие статистические характеристики сменных графиков нагрузки УПП (по вводам подстанций и по фидерам, питающим добычные участки).

Усредненное значение мощности за период измерений. Для расчета принимались значения мощности  $P_i$  в период работы механизмов на временном интервале 30 мин и более, а всплески продолжительностью менее 30 мин усреднялись с прилегающими значениями мощности на 30-ти минутном интервале

$$P_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  - число интервалов значений мощности принятых для расчета.

Среднее квадратическое отклонение значений мощности

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2}. \quad (2)$$

При доверительной вероятности определения значений мощности  $\Phi=0,98$  и известном числе степеней свободы  $k=n-1$  с помощью распределения Стьюдента [4] определялась величина гарантийного коэффициента отклонения  $t$ .

Максимальная величина доверительного интервала значения мощности определялась по формуле

$$P_{max} = P_{cp} + t \cdot \sigma_{cp}. \quad (3)$$

Выполненные расчёты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные нагрузки и коэффициенты спроса

№ пп	Рудник, шахта, горизонт, подстанция, участок	$P_{cp}$ , Вт	$\sigma_{cp}$ , Вт	$N_d$	$T$ (p=0,98)	$P_{max}$ , Вт	$P_{уст}$ , Вт	$K_c$ факт.	$K_c$ расч.	$\Delta K_c$ , %
ш. Артём гор.-1045 м, УПП-3										
1.	Секция №1	47,5	14,8	67	2,4	83	273	0,3	0,321	+6,9
2.	Участок №12	37,4	14,5	61	2,4	72	249	0,29	0,332	+14,5
3.	Секция №2	41,6	15,1	57	2,4	78	215	0,36	0,354	-1,67
4.	Участок №1	40,8	12,3	58	2,4	70	186	0,37	0,377	+0,5
ш. Артем гор.-1135 м, УПП-5										
1.	Секция №1	47,3	11,5	57	2,4	75	300	0,25	0,31	+24
2.	Участок №4	34	9,9	49	2,4	57,8	273	0,16	0,321	+100
3.	Секция №2	46	15,2	43	2,42	83	478	0,174	0,27	+55
4.	Участок №5	12,2	4,6	33	2,45	23,5	386	0,061	0,285	+367
ш. Центральная гор.-1065 м, Тяговая п/ст.										
1.	Секция №1	98	15,7	102	2,36	135	656	0,205	0,228	+11,2
2.	Заезд №4	13,4	3,2	27	2,48	21,4	18,5			
3.	Заезд №7	27,6	6,8	76	2,38	43,8	143	0,306	0,326	+6,54
4.	Заезд №10	16	5,1	68	2,4	28	91	0,108	0,398	+29,2
5.	Заезд №16	10,5	2,8	25	2,49	17,5	128	0,137	0,33	+140
6.	Заезд №22	11	3,75	19	2,55	20,6	131	0,157	0,337	+114
ш. Саксагань гор.-1020 м, УПП-10										
1.	Секция №2	10,7	7,1	24	2,5	28,5	95,5	0,3	0,388	+29,3
2.	Секция №3	44,2	9,63	32	2,45	67,8	630	0,108	0,228	+112
3.	Орг 205	19,3	5,9	38	2,43	33,5	341	0,1	0,253	+153
4.	Орг 209	26,3	7,2	43	2,42	43,7	280	0,156	0,264	+69,2

5. Средний расход активной электроэнергии за смену

$$W_{a\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{a i}}{n}, \quad (4)$$

где  $W_{a i}$  - расход активной электроэнергии за конкретную смену, кВт\*ч;  $n$  - число исследованных смен.

6. Среднее квадратическое отклонение расхода электроэнергии за смену от её среднего расхода за смену, при ограниченном количестве измерений ( $n < 30$ )

$$\sigma_{W_{a\text{cp}}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_{a i} - W_{a\text{cp}})^2}. \quad (5)$$

7. При доверительной вероятности измерения расхода электроэнергии  $\Phi=0,95$ , определялась величина гарантийного коэффициента отклонения расхода ЭЭ за смену.

Максимальное значение доверительного интервала расхода электроэнергии за смену

$$W_{a\text{max}} = W_{a\text{cp}} + t \cdot \sigma_{W_{a\text{cp}}}. \quad (6)$$

9. Доверительный интервал усредненного максимального значения мощности

$$P'_{max} = \frac{W_{a\text{max}}}{7}, \quad (7)$$

где 7 - продолжительность смены, час.

Значение расчетной нагрузки по методу коэффициента спроса зависит от установленной мощности и от коэффициента спроса определяемого для однородных групп потребителей [3,4] или же [4] по эмпирическим формулам для смешанных групп потребителей.

Фактический (экспериментальный) коэффициент спроса (приведенный в табл. 2.) для исследованных групп потребителей определялся по формуле:

$$K_{с\text{ факт}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{уст}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{уст}}$  - суммарная установленная мощность потребителей на исследуемом участке.

Для использования в проектной практике необходим расчетный коэффициент спроса, величина которого зависит от варианта расчета. Обычно для подсчета электрических нагрузок методом коэффициента спроса используют три коэффициента:  $K_{с}$  - коэффициент спроса для однородной группы потребителей;  $K_{см}$  - коэффициент смещения максимума, зависящий от количества потребителей;  $tg\varphi$  - коэффициент мощности.

Коэффициенты, необходимые для расчета нагрузки по этому методу, определялись из графиков нагрузки следующим образом:

$$K_{и\text{ факт}} = \frac{P'_{\text{max}}}{P_{\text{уст}}}$$

Эффективное число потребителей  $n_{эф}$  определялось по методике, приведенной [4].

$$K_{м\text{ факт}} = f(n_{эф}; K_{и\text{ факт}}).$$

$$P'_{\text{расч}} = K_{м\text{ факт}} \cdot P'_{\text{max}}$$

Погрешность вычислений  $P'_{\text{расч}}$  по сравнению с максимальной величиной доверительного интервала значения мощности  $P_{\text{max}}$ :  $P'_{\text{расч}}\% = \frac{P'_{\text{расч}} - P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} 100\%$ .

Расчетный коэффициент максимума  $K_{мр}$  при наиболее вероятном значении группового коэффициента использования  $K_{ир}$ , принятого на основании проведенных исследований равным 0,15, определяется аналогично п.3.

$$P_{\text{расч}} = K_{ир} \cdot K_{мр} \cdot P_{\text{уст}}$$

$$P_{\text{расч}}\% = \frac{P_{\text{расч}} - P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} 100\%$$

На основании проведенных исследований произведен расчет средневзвешенного  $tg\varphi$  по каждому исследуемому вводу и участку, а также по всем вводам и участкам

$$tg\varphi_{ср} = \frac{\sum_1^n W_{рi}}{\sum_1^n W_{аi}} \quad (9)$$

где  $\sum_1^n W_{рi}$  и  $\sum_1^n W_{аi}$  - расход активной и реактивной энергии по вводу (участку) за исследуемый промежуток времени.

Данные расчета приведены в табл. 3.

В соответствии с программой исследований при производстве измерений активной и реактивной мощности каждого фидера фиксировались также значения сменной производительности по отдельным блокам и присоединениям в целом непосредственно в местах разгрузки по опрокидах соответствующих горизонтов. Регистрация исследуемых параметров производилась в течение 143 смен на 11 добычных блоках и 106 смен на 7 вводах силовых трансформаторов участковых подстанций. Изменение производительности, как технологического показателя зависит от множества факторов, главенствующими из которых являются горнотехнологические условия и порядок организации работ. Влияние же данный показатель на электропотребление оказывает косвенное, в результате чего, как показывают исследования, связь между расходом ЭЭ и производительностью слабо коррелирована.

Подобные исследования, проведенные ранее к.т.н. В.Ф. Калиниченко, Щеткой В.Ф. и некоторыми другими учеными [2,5], также показывали недостаточную связь между электропотреблением и производительностью: корреляционное отношение для наиболее распространенной системы поэтажного обрушения составляло всего  $r = 0,66$ . Исходя из вышеизложенного данный метод не может дать достаточно обоснованных результатов и его практическое использование возможно только при наличии обширных и постоянно обновляемых исследований.

Коефіцієнт потужності

№ пп	Шахта, горизонт п/ст, участок	$\sum_1^n W_{атк}$ Вт·ч	$\sum_1^n W_{рп}$ кВАр·ч	$tg\phi_{с.в}$	$\sum_1^n W_{атmax}$ кВт·ч	$\sum_1^n W_{рпmax}$ кВАр·ч	$tg\phi_{max}$	$P_{max}$ кВт	$Q_{max}$ кВар	$S_{max}$ кВА
ш. Артём, гор. 1025 м, УПП - 3										
1.	Секция №1	2966	2590	0,91	511,3	375	0,73	83	60,6	103
2.	Участок №12	1947	1304	0,67	536	353,4	0,66	72	47,5	86,3
3.	Секция №2	1115	1030	0,92	377	377	0,846	78	66	102
4.	Участок №1	1548	1471	0,95	476	476	0,82	70	57,4	90,5
ш. Артём, гор. 1135 м, УПП - 5										
1.	Секция №1	2378	1859	0,78	546	386	0,706	75	53	92
2.	Участок №4	1237	939	0,76	188	137	0,73	57,8	42,2	71,6
3.	Секция №2	2109	1483	0,703	377,4	275,6	0,73	83	60,6	103
4.	Участок №5	432	871	2,02	128	216	1,69	23,5	39,7	46

При расширении «географии» исследований необходим был комплексный подход со строгим учетом основных влияющих факторов по системам обработки блоков, степени механизации технологических операций, квалификации персонала и др.

В ходе этих исследований в процессе измерений фиксировались сменный расход электроэнергии, сменная добыча участка или группы блоков, количество и установленная мощность потребителей электрической энергии. Целесообразность выполнения замеров обусловлена тем, что норма удельного расхода ЭЭ, следовательно, и планируемое потребление ЭЭ не являются величинами постоянными и неизменными, а относятся к определенному уровню производства работ по добыче железной руды. Полученные данные дали возможность определить удельный реальный расход электроэнергии  $\mathcal{E}_y$  на 1т добываемой сырой руды.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Из проведенного анализа выяснилось, что диапазон изменения удельного расхода электрической энергии на вводах силовых трансформаторов (включающих группу участков) составляет  $0,273 < \mathcal{E}_y, п/ст < 0,904$ , а по отдельным блокам  $0,173 < \mathcal{E}_y < 0,593$ .

Характер изменения  $\mathcal{E}_y$  зависит от значений технологических удельных расходов по отдельным операциям. Общий расход электрической энергии, потребляемой участком (блоком), состоит из двух составляющих:

непосредственно не зависящей от производительности участка (энергия, потребляемая вентиляторами частичного проветривания, осветительными и другими приборами). Эта составляющая колеблется в определенных пределах, так как потребители не работают строго установленное число часов в смену;

непосредственно зависящей от производительности участка энергия, потребляемая скреперными лебедками, вибролюками). В среднем с ростом производительности участка увеличивается расход электроэнергии на скреперование.

В результате  $\mathcal{E}_y$  на 1т руды, представляющий отношение общего расхода ЭЭ в смену к сменной производительности участка, с увеличением производительности уменьшается.

#### Список литературы

Електрифікація гірничого виробництва: Підручник для ВНЗ: у 2-х т. – Вид. 2-ге перероб. та допов./ За рецензією Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. т.1. – 503 с.

Щетка В.Ф., Єпісахов Ю.Я., Ткачук А.И. Разработка и внедрение высокоэффективных систем электроснабжения шахты. КГРИ. Отчет по НИР, тема 20-372-80., Кривой Рог, 1981 с.125.

Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

Щуцкий В.И., Ляхомский А.В., Крицевый Ю.Т. Прогнозирование энергопотребления на основе факторных моделей. Межвузовский сборник «Безопасность и надежность электроснабжения». – Норильск, 1989. – с. 77 – 81.

Калиниченко В.Ф. Определение нагрузки на шинах подземной подстанции шахты. НИГРИ. Бюллетень НТИ., Кривой Рог, 1980 с.87.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.13