Записки Ленинградского ордена Ленин., ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т./XXX1У, 1979 г.

ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Б.П.КОНОВАЛОВ, Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ,
Л.Н.СМИРНОВА

Повышение эффективности работы калийных рудников связано с совершенствованием всех звеньев технологического процесса по добыче калийной руды и, в первую очередь, с обеспечением бесперебойной и надежной работой добычных и транспортных машин, устойчивая и высокопроизводительная работа которых зависит от качества электрической энергии в подземной распределительной сети. „Под качеством энергии у ее приемников можно понимать совокупность ее потребительских свойств, обусловливающих пригодность энергии удовлетворять определенные потребности приемников в соответствии с их назначением" [I, с.I3]. Показатели, характеризующие качество электрической энергии, нормированы ГОСТом I3I09-67.

Распределительная сеть такого энергоемкого потребителя (мощность 25-30 МВ·А), как калийный рудник, обладает по сравнению с общепромышленными сетями рядом специфических особенностей: большой протяженностью питающих горные участки кабельных линий 6 кВ (до 8-9 км при средней длине 4,5-5 км); сосредоточенностью нагрузок в конце линий; большими единичными мощностями добывающих и транспортных машин (200-300 кВт и более); резкопеременным характером нагрузок добывающих комплексов; стохастическим характером нагрузок, определяемых самим процессом разрушения полезного ископаемого.

Структуру распределительных сетей калийных рудников рассмотрим на примере производственного объединения „Белорускалий". Четыре и более секций приблизительно равной мощности питаются от вторичной обмотки установленного на поверхности понижающего трансформатора II0/6 кВ мощностью 32-40 МВ·А. Мощность отдельной секции шин, питающей 2-3 горных участка, 5-7 МВ·А. В сети рудника используется в основном два номинальных уровня напряжения: высокое 6 кВ (питающие линии) и низкое 0,66 кВ (электроприемники).

Центром нагрузок является центральная подземная подстанция ЦПП, состоящая из двух и более секций шин. От секции шин поверхностной трансформаторной подстанции ТП (см.рисунок) по стволовым кабелям (главному

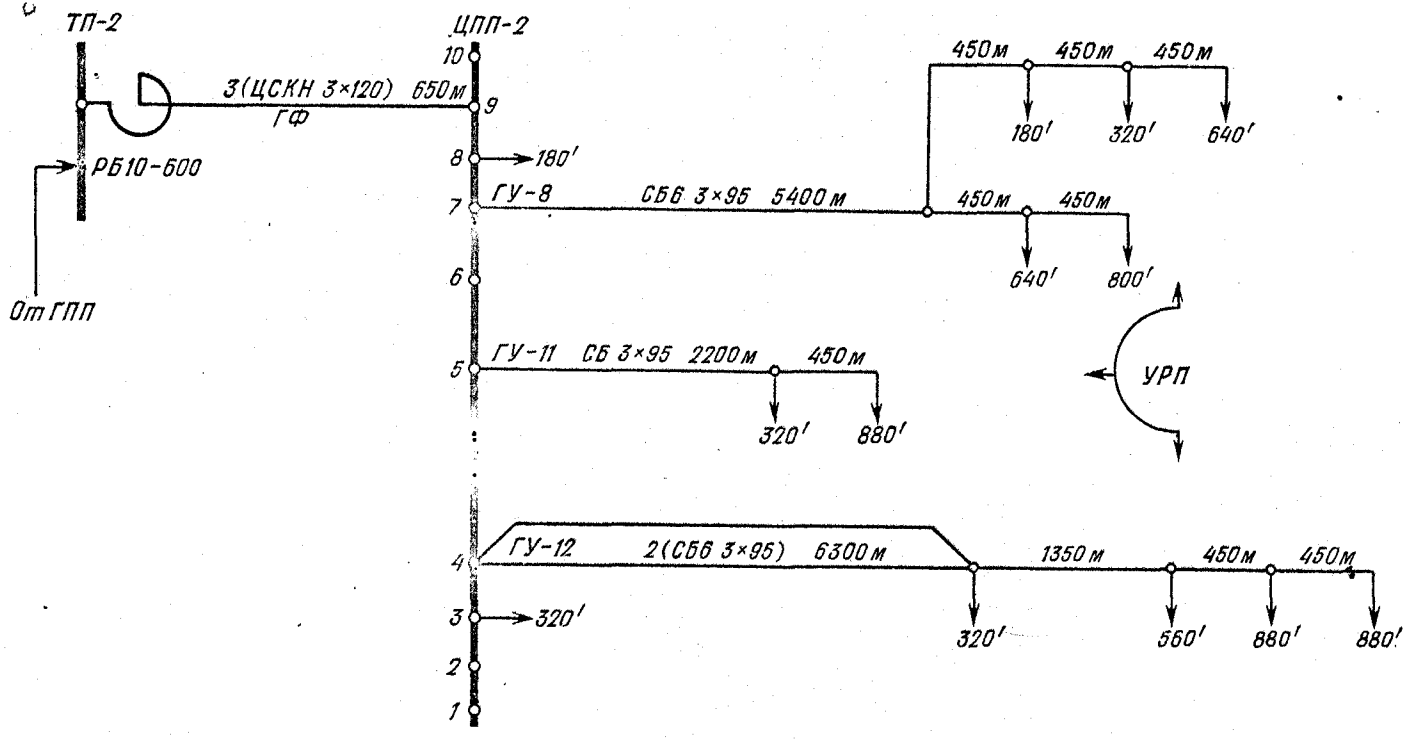


Схема электроснабжения группы горных участков калийного рудника
Показатели со штрихом относятся к установленной мощности в киловольтамперах

фидеру - ГФ) питается соответствующая секция шин ЦПП, от которой отходят питающие линии к участковым распределительным пунктам УРП. К шинам участковых распределительных пунктов УРП подсоединяются передвижные трансформаторные подстанции 6/0,66 кВ. Так как мощность короткого замыкания подземной сети ограничена величиной $S_{к.з}$ = 50 МВ·А, главные фидеры секций реактированы (реактор РБ).

Большая длина кабельных линий 6 кВ приводит в нормальных режимах работы к высоким потерям напряжения от шин поверхностной ТП до шин УРП - до 10-17%, т.е. не обеспечивается требуемое ГОСТом качество напряжения даже в питающей части сети. Следовательно, необходимы режимные мероприятия, улучшающие качество напряжения. Они возможны только на основании четкого знания фактических режимов напряжений и нагрузок в сети.

На третьем Всесоюзном совещании по качеству электрической энергии (г.Баку, 1973 г.) среди основных направлений научных исследований была принята разработка принципов организации и методических основ производства контрольных измерений показателей качества электрической энергии. В распределительной сети рудника отсутствуют преобразовательные установки и мощные однофазные электроприемники. Основная нагрузка сети (до 98%) двигательная (трехфазная), поэтому одним из важнейших показателей качества электрической энергии для распределительной сети калийного рудника [2] является отклонение напряжения.

За отсутствием специализированных методик и приборов качество электрической энергии в распределительных сетях горных предприятий определяли серийно выпускаемыми промышленностью показывающими, интегрирующими и регистрирующими приборами и опытными образцами статистического анализатора качества напряжения САКН-1.

Одной из главных задач исследования было установление достоверного интервала наблюдения. С этой целью отсчеты интегрирующих приборов (счетчиков активной и реактивной энергии) записывали через 10 мин , у САКН-1 интервал дискретности принят минимальным 8,5-9 с. Регистрирующие приборы включали на всю смену, чтобы можно было судить о пределах и характере изменения во времени записываемых величин.

Измерения производили одновременно в различных точках распределительной сети (ТП, ЦПП и УРП) только в рабочие смены. Экспериментальные данные здесь и далее для удобства представлены в относительных единицах и отмечены звездочкой: напряжение $U^* = U/U_Б$; ток $I^* = I/I_Б$; полная мощность $S^* = S/S_Б$; активная мощность $P^* = P/S_Б$; реактивная мощность $Q^* = Q/S_Б$. В качестве базовых (индекс Б) абсолютных величин приняты (для секции): напряжение $U_Б$ = 6000 В; ток $I_Б$ = 600 А; мощность $S_Б$ = $= \sqrt{3}\,U_Б I_Б = \sqrt{3}\cdot 6000\cdot 600\cdot 10^{-3} = 6235$ кВ·А.

В результате экспериментов определялись минимальные, максимальные и среднестатистические параметры режима. Гистограмма отклонений напряжения пригодна лишь для определения соответствия качества напряжения нормам ГОСТ [3], поэтому качество напряжения исследовали в рамках теории распределений для установления необходимой достоверной длительности измерений. Длительность измерения качества напряжения на шинах ЦПП колебалась от 1 до 90 рабочих смен.

Таблица 1

Вероятностные характеристики качества напряжения

Число рабочих смен	Функции распределения отклонений напряжения для середин разрядов (%)									N при Δt=8,4 с	$\bar{V}$, %	s^2, $(\%)^2$
	-13,75	-11,25	-8,75	-6,25	-3,75	-1,25	+1,25	+3,75	+6,25			
						ЦПП-1						
47	0,0000	0,0004	0,0097	0,0937	0,3220	0,5748	0,7869	0,9477	1,000	121866	-3,086	11,959
10	0,0000	0,0000	0,0050	0,0520	0,2810	0,6030	0,7840	0,9250	1,000	24932	-1,382	10,998
10	0,0000	0,0030	0,0480	0,2350	0,5370	0,7980	0,9590	1,000	1,000	26947	-2,702	9,490
3	0,0000	0,0000	0,3000	0,4020	0,7320	0,9360	1,000	1,000	1,000	7171	-4,065	5,720
3	0,0000	0,0000	0,0005	0,0240	0,2399	0,5627	0,7532	0,9309	1,000	7771	-3,684	10,005
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	0,1100	0,5218	0,8865	0,9514	1,000	2569	-2,449	5,609
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,1953	0,7988	0,8631	1,000	1,000	2520	-3,647	3,190
						ЦПП-2						
90	0,0015	0,0312	0,2068	0,4644	0,7080	0,9088	0,9915	1,000	1,000	235335	-4,508	11,190
10	0,0087	0,0315	0,1665	0,4305	0,6805	0,9035	0,9976	1,000	1,000	24272	-4,276	10,685
10	0,0000	0,0075	0,0659	0,2503	0,4853	0,7005	0,8795	0,9940	1,000	24456	-2,200	13,516
3	0,000	0,000	0,0378	0,3678	0,6858	0,8518	0,9578	1,000	1,000	6954	-3,484	9,090
3	0,000	0,0131	0,1262	0,4362	0,7282	0,8381	0,9638	1,000	1,000	7138	-4,015	11,295
1	0,000	0,0000	0,0008	0,0501	0,4745	0,7300	0,9640	1,000	1,000	2419	-3,117	8,367
1	0,000	0,0155	0,1720	0,4905	0,8770	1,000	1,000	1,000	1,000	2252	-5,135	5,626

Функции распределения отклонений напряжения для различных интервалов наблюдения, представленные в табл.I, проверены по критерию χ-квадрат на их соответствие друг другу и нормальному закону распределения вероятностей. Функции распределения для 47 и 90 смен строго подчинены нормальному закону, для I0 смен - близки к нормальному закону. Проверка на соответствие функций распределения для I0 и 3 смен показывает с вероятностью p = = 0,95 (без учета хвостов) их близость. Таким образом в качестве достоверного можно рекомендовать интервал измерения, равный I0 сменам (в отдельных случаях достаточно 3 смен), т.е. во много раз сократить одномесячную длительность измерения, рекомендуемую ГОСТом, и удешевить получение информации о качестве напряжения.

Режимы напряжений нельзя рассматривать в отрыве от режимов нагрузок распределительной сети. В табл.2 приведены выборочные значения нагрузок для I0-минутного и часового интервала осреднения в течение рабочей смены. Для удобства анализа эти нагрузки расположены не во времени, а в порядке возрастания. Параметры режима определены обычными и вероятностно-статистическими методами:

мощность

$$S^* = \left(P^{*2} + Q^{*2}\right)^{1/2};$$

Таблица 2

Показатель режима								
$\bar{S}^*$	$tg\varphi$	$\bar{I}^*_{ГФ-1}$	$\bar{U}^*_{ТП-1}$	$\bar{U}^*_{ЦПП-1}$	$\bar{U}^*_{УРП-5}$	$\delta\bar{U}$, %		
						ТП-1 ЦПП-1	ЦППН УРП-5	ТП-1 УРП-5
Δt = 10 мин								
0,154	1,962	0,151	1,028	1,018	0,998	1,0	1,8	2,8
0,256	1,326	0,252	1,026	1,012	0,994	1,4	2,0	3,4
0,412	1,151	0,423	1,017	0,974	0,948	4,3	2,6	6,9
0,510	1,550	0,523	1,019	0,974	0,935	4,5	3,9	8,4
0,552	1,166	0,576	1,010	0,958	0,892	5,2	6,6	11,8
0,600	1,326	0,629	1,009	0,954	0,905	5,5	4,9	10,4
0,650	1,159	0,683	1,008	0,951	0,873	5,7	7,8	13,5
0,702	1,034	0,736	1,012	0,954	0,890	5,8	6,4	12,2
0,756	1,316	0,797	1,012	0,948	0,896	6,4	5,2	11,6
0,812	0,966	0,863	0,997	0,941	0,862	5,6	7,9	13,5
0,835	1,000	0,883	1,011	0,945	0,874	6,6	7,1	13,7
0,853	1,138	0,912	1,011	0,935	0,876	7,6	5,9	13,5
Δt = 1 ч								
0,339	1,538	0,343	1,016	0,989	0,953	2,7	3,6	6,3
0,517	1,316	0,532	1,020	0,972	0,917	4,8	5,5	10,3
0,620	1,175	0,652	1,005	0,951	0,877	5,4	7,4	12,8
0,685	1,191	0,724	1,009	0,946	0,881	6,3	6,5	12,8
0,699	1,090	0,739	1,005	0,946	0,856	5,9	9,0	14,9
0,732	1,213	0,768	1,012	0,953	0,884	5,9	6,9	12,8
Одна смена								
0,598	1,249	0,623	1,011	0,959	0,894	5,2	6,5	11,7

коэффициент мощности

$$tg\varphi = a^*/P^*;$$

ток нагрузки

$$I^*_{ГФ} = S^*/U^*;$$

отклонение напряжения

$$\bar{V} = \frac{1}{N}\sum_{1}^{8} V_i n_i ,$$

где i = 1,2,...,8 - порядковый номер разряда САКН-1; $\bar{V}_i$ - середина i-го разряда; n_i - число отсчетов в i-м разряде; $N = \sum_{1}^{8} n_i$ - сумма всех отсчетов;

дисперсия

$$s^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{8} V_i^2 - \bar{V}^2;$$

среднее значение напряжения

$$\bar{U}^* = 1 + \bar{V}^*;$$

потеря напряжения на участке ТП-УРП

$$\delta\bar{U}^* = \bar{U}^*_{\text{ТП}} - \bar{U}^*_{\text{УРП}}.$$

Из табл.2 следует, что большей нагрузке соответствует, как правило, меньший уровень напряжения. Напряжение на шинах ТП зависит от нагрузки в меньшей мере, чем на шинах ЦПП или УРП. При изменении нагрузки ГФ от 0,I5 до 0,9 потеря напряжения в высоковольтной части сети изменяется от 2,8 до I3,5%. Таким образом, связь между величиной нагрузки и напряжением носит не функциональный, а стохастический характер. Ограничившись линейной регрессией $U^*_{\text{ЦПП}}$ на $I^*_{\text{ГФ}}$,

$$U^*_{\text{ЦПП}} = b_0 + b_1 I^*_{\text{ГФ}},$$

можно определить коэффициенты b_0 и b_1 по множеству пар значений $U^*_{\text{ЦПП}}$ и $I^*_{\text{ГФ}}$. Как следует из табл.2, $\operatorname{tg}\varphi$ также стохастически связан с $I^*_{\text{ГФ}}$

$$\operatorname{tg}\varphi_{\text{ГФ}} = \alpha_0 + \alpha_1 I^*_{\text{ГФ}}.$$

По результатам 3464 почасовых записей напряжения и тока в оперативном журнале дежурного ЦПП-2 (калийный рудник 2-го рудоуправления) определены b_0 = I,04, b_1 = -0,073 и коэффициент корреляции [2] r_{UI} = -0,658. Полученное уравнение регрессии имеет вид

$$U^*_{\text{ЦПП-2}} = \text{I,04} - 0{,}073\, I^*_{\text{ГФ-2}}. \qquad (\text{I})$$

Линейная регрессионная связь, установленная по 47 среднесменным значениям $\bar{U}^*_{\text{ЦПП-1}}$ (табл.I) и соответствующим им среднесменным значениям нагрузки $\bar{I}^*_{\text{ГФ-1}}$ (коэффициент корреляции $r_{\bar{U}\bar{I}}$ = -0,622), имеет вид

$$\bar{U}^*_{\text{ЦПП-1}} = \text{I,02I} - 0{,}094\,\bar{I}^*_{\text{ГФ-1}}. \qquad (2)$$

Зависимость между $\operatorname{tg}\varphi_{\text{ГФ-1}}$ и $I^*_{\text{ГФ-1}}$, полученная обработкой I0-минутных записей P^*, Q^*, U^*,

$$\operatorname{tg}\varphi_{\text{ГФ-1}} = \text{I,984} - \text{I,28I}\, I^*_{\text{ГФ-1}}. \qquad (3)$$

При определении коэффициентов уравнений (I)-(3) принят одинаковый уровень значимости α = 0,05, т.е. доверительная вероятность $p = 1 - \alpha$ = = 0,95.

Уравнения (I) и (2), связывающие режимы напряжений и нагрузок распределительной сети, можно использовать в качестве законов регулирования [4] в центрах питания (шины ЦПП) нагрузок горных участков.

Однако для оптимизации режимов напряжений в распределительной сети рудника необходимо располагать информацией о всей функции сетевого напряжения, т.е. проведенный анализ в рамках теории распределений должен дополняться анализом временных рядов напряжения [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Качество электрической энергии в условиях научно-технического прогресса. – Тр. Ленингр. инж.-экономич.ин-та им.П.Тольятти, 1975, вып. III.

2. Коновалов Б.П. Исследование качества напряжения в распределительных сетях калийных рудников. – Автореф. канд. дисс. ЛГИ, 1977.

3. Аберсон М.Л. Оптимизация регулирования напряжения. М., Энергия, 1975.

4. Акимцев Ю.И. О вероятностном характере законов регулирования напряжения и критериях его оценки. – Изв. вузов, Энергетика, 1973, № 8.