

УДК 621.311.004.12

## Экономическое обоснование применения компенсирующих устройств для согласования трехфазной трехпроводной линии электропередачи с нагрузкой

В.А. Козлов<sup>1 a</sup>, Г.А. Большанин<sup>2 b</sup>, О.А. Козлова<sup>3 c</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Братская электросетевая компания», Дружбы 45, Братск, Россия

<sup>2</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, Нежинская 7, Москва, Россия

<sup>a</sup>kozlov\_va@bk.ru, <sup>b</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>c</sup>blestoks@yandex.ru

Статья поступила 14.03.2014, принята 16.05.2014

*Техническое обеспечение согласования линии электропередачи с электрической нагрузкой заключается в использовании компенсирующих устройств активной и реактивной мощностей. Их использование предполагает дополнительные затраты. Поэтому необходимо экономическое обоснование такого согласования. Показан пример выполнения такого обоснования для реального объекта. Приведены статистические параметры напряжений и токов для ЛЭП – 330кВ, обеспечивающей электрической энергией один из промышленных районов страны. Определены графики нагрузки по напряжению и току в дневной и ночной периоды. Определены статистические параметры передаваемой потребителю электрической энергии отдельно в дневной и ночной периоды. Определена общая стоимость этой энергии по действующему в 2013 году тарифу для городского населения. Определен коэффициент полезного действия анализируемой линии электропередачи до и после ее согласования с электрической нагрузкой. Показано, что согласование трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения с нагрузкой обеспечивает повышение коэффициента полезного действия передачи электрической энергии более чем на 50%. Определена мощность компенсирующих устройств активной и реактивной мощностей, используемых для согласования линии электропередачи с электрической нагрузкой. Установлена их стоимость. Показано, что эффективность использования этих устройств составляет более 6 млрд. руб. со сроком их окупаемости около пяти лет. На основании выполненных исследований сделан вывод об экономической целесообразности согласования анализируемой линии электропередачи с электрической нагрузкой.*

**Ключевые слова:** трехпроводная линия электропередачи, согласованный режим, электрическая нагрузка, падающая волна, эффективность согласования.

## Economic justification of the use of compensating devices for coordination of a three-phase three-wire power line with loading

V.A.Kozlov<sup>1 a</sup>, G.A.Bolshaning<sup>2 b</sup>, O.A. Kozlova<sup>3 c</sup>

<sup>1</sup>CJSC «Bratsk Power Energy Company», 45 Druzhba St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup>Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>3</sup>Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics, 7 Nezhinskaya St., Moscow, Russia

<sup>a</sup>kozlov\_va@bk.ru, <sup>b</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>c</sup>blestoks@yandex.ru

Received 14.03.2014, accepted 16.05.2014

*Technical ensuring of coordination of a power line with electric loading consists in the use of compensating devices of active and reactive capacities. Their use assumes additional expenses. Therefore, the economic justification of such coordination is necessary. The example of the performance of such justification for real object has been shown in the article. Statistical parameters of tension and currents for the high voltage line are 330kV, that provides with electric energy one of the industrial regions of the country. Production schedules have been determined by tension and current during day and night periods. Statistical parameters of electric energy transmitted to the consumer separately during the day and night periods have also been determined. The total cost of this energy has been determined by a tariff operating in 2013 for urban population. The efficiency output of analyzed power line before its coordination with electric loading has been defined. It has been shown that the coordination of a three-phase three-wire power line with loading provides the increase of efficiency for transferring electric energy for more than 50%. The power for compensating devices of active and reactive capacities used for coordination of a power line with electric loading has been determined. Their cost has been established. It has been shown that the efficiency of the use of these devices makes more than 6 billion rubles with the term of the payback of about 5 years. On the basis of the research, it can be concluded that it is economically feasible to coordinate analyzed power line with electric loading.*

**Keywords:** three-wire power line, coordinated mode, electric loading, falling wave, efficiency of coordination.

**Введение.** Одним из методов улучшения качества электроэнергии в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) с распределенными параметрами трехфазного трехпроводного исполнения напряжением 220 кВ и выше является согласование ЛЭП с электрической нагрузкой [1]. Условия согласования трехфазных трехпроводных высоковольтных ЛЭП легли в основу ряда изобретений, целью которых является стабилизация согласованного режима работы ЛЭП [2, 3].

**Постановка и решение задач.** Реализация этих условий связана с применением компенсирующих устройств (КУ), устанавливаемых, например, на шинах нагрузки.

Пусть в качестве КУ активной мощности (КУАМ) используется гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС). Хотя в принципе в качестве КУАМ может быть использован любой другой источник активной мощности, а в качестве КУ реактивной мощности – источник реактивной мощности (КУРМ) (это может быть батарея косинусных конденсаторов). Поскольку использование КУ предполагает затраты, то необходимо оценить их экономическую эффективность, на основании чего сделать вывод о целесообразности их применения.

В течение года было получено более 360 циклов суточных измерений на шинах нагрузки, на основании которых были определены фазные напряжения, линейные токи, построены усредненные кривые аппроксимирующих полиномов, отображающих функциональные зависимости коэффициентов формы суточных графиков от времени года [4, 5].

Полученные при этом статистические величины токов и напряжений будут такими, какими они приведены в табл. 1 (день) и табл. 2 (ночь).

Для исследуемой ЛЭП 330 кВ (протяженность 450 км, марка провода – АС-600/72), предназначенной для передачи электроэнергии к мощной электростанции, фазное номинальное напряжение на нагрузке было равно 190751,45 В, номинальный ток – 1572,72 А.

Продолжительность периодов дня и ночи определена распоряжением комитета по ценам и тарифам Московской области от 14.12.2012 г. № 130-Р. Так, продолжительность дня определена с 7:00 до 23:00 (16 часов), и ночи – с 23:00 до 7:00 (8 часов). Расчетным следует считать 2013 г.

Графики, построенные по данным табл. 1 и 2, представлены на рис. 1 и 2.

Мощность, потребляемая нагрузкой за год, с учетом табл. 1 и табл. 2 определена соответственно в табл. 3 и табл. 4.

Правительством Москвы было принято решение об установлении тарифов на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей на территории г. Москвы на 2013 год (постановление правительства Москвы от 27.11.2012 г. № 671-ПП, постановление региональной энергетической комиссии г. Москвы от 30.11.2012 г. № 292). Так, тариф на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей на территории г. Москвы, за исключением потребителей Троицкого и Новомосковского административных округов, с 1 января 2013 г. следующий: дневная зона Т1 (7.00-23.00) – 3,17 руб./кВт·ч; ночная зона Т2 (23.00-7.00) – 0,81 руб./кВт·ч.

Таблица 1

Статистические параметры напряжения и тока (день)

Номинальное фазное напряжение нагрузки (U), В	Номинальный ток нагрузки (I), А	День		Фазное напряжение, В (1) · (3)	Ток нагрузки, А (2) · (4)
		(U) К <sub>дн</sub>	(I) К <sub>дн</sub>		
190751,4451	1572,72	0,912	0,862	173965,32	1355,68
		0,905	0,879	172630,06	1382,42
		0,931	0,81	177589,59	1273,90
		0,949	0,722	181023,12	1135,50
		0,956	0,726	182358,38	1141,79
		0,956	0,772	182358,38	1214,14
		0,949	0,805	181023,12	1266,04
		0,956	0,822	182358,38	1292,78
		0,952	0,735	181595,38	1155,95
		0,951	0,774	181404,62	1217,29
		0,928	0,834	177017,34	1311,65
		0,921	0,878	175682,08	1380,85

Таблица 2

Статистические параметры напряжения и тока (ночь)

Номинальное фазное напряжение нагрузки, В	Номинальный ток нагрузки, А	Ночь		Фазное напряжение, В (1) · (3)	Ток нагрузки, А (2) · (4)
		(U) К <sub>веч</sub>	(I) К <sub>веч</sub>		
190751,4451	1572,72	0,846	0,574	161375,72	902,74
		0,836	0,585	159468,21	920,04
		0,86	0,551	164046,24	866,57
		0,886	0,5	169005,78	786,36
		0,892	0,484	170150,29	761,19
		0,899	0,538	171485,55	846,12
		0,897	0,586	171104,05	921,61
		0,909	0,617	173393,06	970,37
		0,904	0,517	172439,31	813,09
		0,879	0,468	167670,52	736,03
		0,868	0,513	165572,2543	806,81
		0,855	0,553	163092,4855	869,71

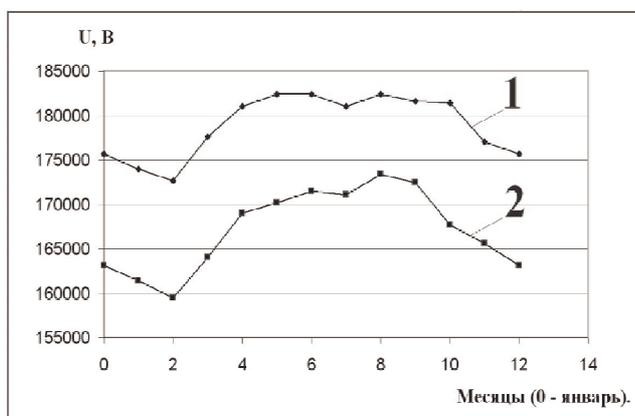


Рис. 1. Распределение величины напряжения нагрузки в течение года: 1 – за день (7:00 – 23:00); 2 – за ночь (23:00 – 7:00)

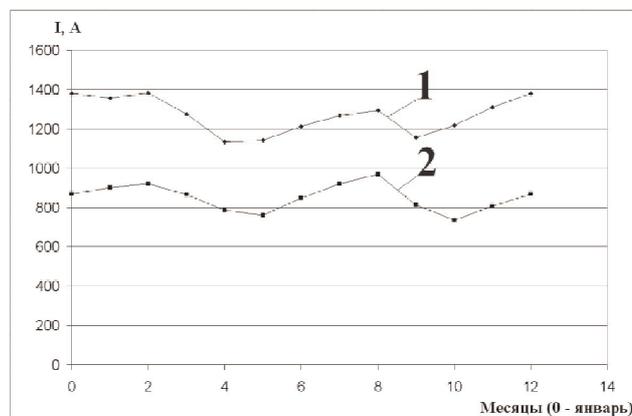


Рис. 2. Распределение величины тока нагрузки в течение года: 1 – за день (7:00 – 23:00); 2 – за ночь (23:00 – 7:00)

По данным табл. 3 и 4 и на основании двухтарифного учета с применением тарифа для городского населения

определился общая стоимость потребленной энергии нагрузкой ЛЭП за 2013 г. Она приведена в табл. 5.

Таблица 3

Статистические параметры потребленной энергии нагрузкой за время с 7:00 до 23:00

Фазное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Количество дней в 2013 году (помесечно)	Продолжительность дня с 7:00 до 23:00, ч	Активная мощность нагрузки, МВт	Потребленная энергия нагрузкой, кВт·ч
173965,32	1355,68	31	16 (66,6 %)	707,53	350933058,8
172630,06	1382,42	28		715,94	320742100,8
177589,59	1273,9	31		678,69	336633147,3
181023,12	1135,5	30		616,66	295995527,2
182358,38	1141,79	31		624,65	309825165,7
182358,38	1214,14	30		664,23	318828349,6
181023,12	1266,04	31		687,55	341023471
182358,38	1292,78	31		707,25	350793782,6
181595,38	1155,95	30		629,75	302277642,2
181404,62	1217,29	31		662,46	328581914,1
177017,34	1311,65	30		696,55	334345717,9
175682,08	1380,85	31		727,77	360974333,9

Таблица 4

Статистические параметры потребленной энергии нагрузкой за время с 23:00 до 7:00

Фазное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Количество дней в 2013 году (помесячно)	Продолжительность ночи, ч	Активная мощность нагрузки, МВт	Потребленная энергия, кВт·ч
161375,72	902,74	31	8 (33,3 %)	437,04	108386311,59
159468,21	920,04	28		440,15	98594040,07
164046,24	866,57	31		426,47	105765062,91
169005,78	786,36	30		398,69	95687557,51
170150,29	761,19	31		388,55	96361244
171485,55	846,12	30		435,29	104470508,9
171104,05	921,61	31		473,08	117322751,86
173393,06	970,37	31		504,77	125181810,72
172439,31	813,09	30		420,63	100951021,17
167670,52	736,03	31		370,23	91817805,81
165572,25	806,81	30		400,75	96180899,23
163092,49	869,71	31		425,53	105531819,99

Таблица 5

## Сводная таблица

Потребленная энергия, кВт·ч		Тариф, руб./кВт·ч		Стоимость потребленной энергии, тыс. руб.		Общая стоимость потребленной энергии, тыс. руб.
С 7:00 до 23:00	С 23:00 до 7:00	С 7:00 до 23:00	С 23:00 до 7:00	С 7:00 до 23:00	С 23:00 до 7:00	
350933058,8	108386311,59	3,17 (100 %)	0,81 (25,55 %)	12524524,85	1009463,18	13533988
320742100,8	98594040,07					
336633147,3	105765062,91					
295995527,2	95687557,51					
309825165,7	96361244,00					
318828349,6	104470508,90					
341023471	117322751,86					
350793782,6	125181810,72					
302277642,2	100951021,17					
328581914,1	91817805,81					
334345717,9	96180899,23					
360974333,9	105531819,99					

Расчеты, по объему не вошедшие в настоящую статью, показали, что коэффициент полезного действия (к.п.д.) несогласованной ЛЭП равен 70,13 %, а к.п.д. согласованной ЛЭП – 92,04 %. Согласование обеспечивает увеличение к.п.д. трехфазной трехпроводной ЛЭП на 21,91 %. С учетом этого определяется эффект от стабилизации согласованного режима работы ЛЭП в денежном эквиваленте, показанный в табл. 6.

Общая стоимость потребленной энергии согласованной ЛЭП с к.п.д., равным 92,04 %, составляет 13533988 тыс. руб. (табл. 6), а эффективность согласования на данном этапе расчетов, выраженная в денежном эквиваленте, составила 2051272,84 тыс. руб.

Величины активной и реактивной мощностей нагрузки, которые следует компенсировать,

определяются в табл. 7. Реактивная мощность определится с учетом коэффициента мощности  $tg \varphi = 0,35$  [6] с учетом данных табл. 3 и 4.

Стоимость КУАМ на примере высокоэффективной Загорской ГАЭС рассмотрена в табл. 8 с учетом данных табл. 7. Проектная мощность этой ГАЭС 840 МВт (4 обратимых гидроагрегата по 210 МВт) [7].

Полная стоимость всех КУРМ (45 штук) определена в табл. 9 с учетом данных табл. 7 и составляет 92394 тыс. руб.

С учетом данных табл. 8, 9 и 6 рассчитан срок окупаемости КУ в табл. 10. Он определен числом 14,46 лет. Срок окупаемости всего оборудования ГАЭС составляет 25 лет. Эти факты свидетельствуют о целесообразности установки КУ с целью стабилизации согласованного режима работы ЛЭП.

Таблица 6

## Эффективность согласованного режима работы ЛЭП

Общая стоимость потребленной электроэнергии,	К.п.д. согласованной ЛЭП,	К.п.д. несогласованной ЛЭП,	Цена за электроэнергию,	Цена электроэнергии,	Цена электроэнергии, поступающей в нагрузку	Эффективность согласования с учетом

тыс. руб.	%	%	поступающую в нагрузку согласованной ЛЭП, тыс. руб. (5) · (2)	приходящейся на источник питания ЛЭП, тыс. руб. ((1)/(2))·100	несогласованной ЛЭП, с учетом возможности передачи электроэнергии непосредственно от КУ, тыс. руб. (5) · (3) + (5) · 7,96 % (7,96 % потерь активной мощности в согласованной ЛЭП)	возможности передачи электроэнергии в нагрузку непосредственно от КУ, тыс. руб. (4)-(6)
13533988	92,04	70,13	13533988	14704463	11482715,16	2051272,84

Таблица 7

*Полная мощность компенсирующих устройств*

Активная мощность нагрузки, МВт	Наибольшее значение активной мощности нагрузки, МВт	Наименьшее значение активной мощности нагрузки, МВт	Мощность, которую необходимо скомпенсировать, МВт (2) - (3)	Установочная мощность КУАМ, МВт ((4) · 10%)	Установочная мощность КУРМ, МВАр ((5) · tgφ) tgφ = 0,35%	Полная мощность КУ, МВА
Табл. 3 (5), табл. 4 (5)	727,77 (100 %)	370,23 (50,87 %)	357,54	393,29	137,65	771,06

Таблица 8

*Номинальная мощность и цена компенсирующего устройства активной мощности*

Стоимость строительства Загорской ГАЭС, тыс. руб.	Проектная мощность, МВт	Мощность КУ активной мощностью с 10 % увеличением, МВт	Установочная мощность КУАМ $P_{КУАМ}$ , МВт	Загрты на насос-турбинные установки, генераторы и двигатели КУ, тыс. руб.	Стоимость ГАЭС, тыс. руб. ((1) · 50%)
30000000	840 (4 обратимых гидроагрегата по 210 МВт (монтаж 4,37 млрд. руб.))	393	420	2185000 (2 обратимых гидроагрегата по 210 МВт)	15000000

Таблица 9

*Номинальная мощность и цена компенсирующего устройства реактивной мощности*

Стоимость одного устройства КУРМ-3150 кВ Ар/10,5 кВ, тыс. руб.	Установочная мощность КУРМ, МВАр (( $P_{КУАМ}$ ) · tgφ) $P_{КУАМ} = 420$ МВт	Номинальная мощность КУРМ, МВАр ((2)/(1)) · (1) + 1	Стоимость КУРМ, тыс. руб. (1) · 45штук
2053,2 (3150000ВАр)	137,65	141,75 (45 штук)	92394

Таблица 10

*Срок окупаемости компенсирующих устройств*

Стоимость ГАЭС, тыс. руб.	Стоимость КУРМ, тыс. руб.	Стоимость КУ, тыс. руб. (1)+(2)	Эффективность согласования по наименьшему действующему значению активной мощности нагрузки, тыс. руб. в год 2051272,84 (Табл. 6 (7)) · 50,87% (Табл. 7 (3))	Срок окупаемости системы КУ активной и реактивной мощности, лет (3)/(4)
---------------------------	---------------------------	---------------------------------	---	---

15000000	92394	15092394	1043482,49	14,46
----------	-------	----------	------------	-------

### Выводы

1. Срок окупаемости компенсирующих устройств активной и реактивной мощности, работающих с целью стабилизации согласования ЛЭП с нагрузкой, для рассмотренного примера равен 14,46 лет.

2. Показана экономическая эффективность способа реализации мероприятия по согласованию трехфазной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи с электрической нагрузкой.

### Литература

1. Козлов В.А., Большанин Г.А. Условия согласования однородной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи 10 кВ и выше с нагрузкой // Материалы VII международной научно-практической конференции. Прага: Образование и наука, 2011. С. 86-90.

2. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой: пат. 2502176 Рос. Федерация. № 2012120118/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13, Бюл. № 35. 20 с.

3. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой на частотах ярко выраженных гармонических составляющих токов и напряжений: пат. 2502177, Рос. Федерация. № 2012120120/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13; Бюлл. № 35, 11 с.

4. Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г. Сезонная зависимость электропотребления // Проблемы энергетики. 2002. № 4. С.31-39.

5. Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г. Сезонные колебания напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ // Там же. 2002. № 1-2. С. 25-53.

6. Мустафаев Р.И., Миронов Г.А. Суточные графики нагрузки и режимных параметров [Электронный ресурс]. URL:

[http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/fema/artemenko/library/suto4nie\\_grafiki.htm](http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/fema/artemenko/library/suto4nie_grafiki.htm) (дата обращения: 21.10.13).

7. Фролов В.Я., Коротков А.В. Графики активной и реактивной нагрузки бытовых потребителей // Вестн. ИГЭУ. 2001. Вып. 5. С. 1-3.

8. Большая Российская энциклопедия. В 30 т. / науч. ред. Ю.С. Осипов. М.: Большая Рос. энцикл., 2007. Т. 7. 767 с.

### References

11. Kozlov V.A., Bolshinin G.A. Coordination conditions of a uniform three-wire high-voltage power line of 10kV and above with loading // Materialy VII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Praga: Obrazovanie i nauka, 2011. P. 86-90.

2. Kozlov V.A., Bolshinin G.A. Way of coordination of a three-wire power line with electric loading: pat. № 2502176, Rus. Federation. № 2012120118/07; decl. 15.05.2012; publ. 20.12.2013. Bul. № 35. 20 p.

3. Kozlov V.A., Bolshinin G.A. Way of coordination of a three-wire power line with electric loading at frequencies of evident harmonious components of currents and tension: pat. № 2502177, Rus. Federation. № 2012120120/07; decl. 15.05.2012; publ. 20.12.2013. Bull. № 35, 11p.

4. Mustafayev R.I. Mironov G.A. Mironov R.G. Seasonal dependence of power consumption. // Problemy jenergetiki. 2002. № 4. P.31-39.

5. Mustafayev R.I. Mironov G.A. Mironov R.G. Seasonal fluctuations of tension in distributive networks of 6-10 kV. // Problemy jenergetiki. 2002. №1-2, P.25-53.

6. Mustafayev R.I., Mironov G.A. Daily production schedules and regime parameters [Electronic resource]. URL: [http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/fema/artemenko/library/suto4nie\\_grafiki.htm](http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/fema/artemenko/library/suto4nie_grafiki.htm). (applying date 21.10.2013).

7. Frolov V.Ya., Korotkov A.V. Diagrams of active and reactive loading of household consumers // Vestn. IGEU. 2001. Issue 5. P. 1-3.

8. Big Russian encyclopedia: In 30 vol. / nauch. red. Ju.S. Osipov. M.: Bol'shaja Ros. jencikl., 2007. Vol. 7. 767 p.