

УДК 621.311.004.12

## Техническое обоснование применения компенсирующих устройств для стабилизации согласованного режима работы высоковольтной линии электропередачи

В.А. Козлов<sup>а</sup>, Г.А. Большанин<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>kozlov\_va@bk.ru, <sup>б</sup>bolshaning@mail.ru

Статья поступила 6.05.2014, принята 20.07.2014

*Техническое обеспечение согласования линии электропередачи с электрической нагрузкой с последующей стабилизацией режима предполагает использование специально подобранных компенсирующих устройств активной и реактивной мощностей. Сформированы основные требования к компенсирующим устройствам активной и реактивной мощностей, используемым для обеспечения мероприятия по стабилизации согласованного режима работы линии электропередачи. Приведен пример технического обоснования для реального объекта. Приведены результаты статистических исследований передачи активной и реактивной мощностей по ЛЭП-330 кВ в один из промышленных районов страны в течение года. Определены установленные активная и реактивная мощности компенсирующих устройств. Показано, что компенсирующие устройства установленной мощности обеспечат согласованный режим работы линии электропередачи, по крайней мере, в течение года. Определены погрешности в работе компенсирующих устройств активной и реактивной мощностей. Показано, что компенсирующие устройства активной и реактивной мощностей работают с минимальными погрешностями. На основании выполненных исследований сделан вывод о целесообразности применения выбранных компенсирующих устройств для реализации и последующей стабилизации согласованного режима работы линии электропередачи.*

**Ключевые слова:** трехпроводная линия электропередачи, согласованный режим, электрическая нагрузка, падающая волна, компенсирующее устройство.

## Technical basis for the use of compensating devices to stabilize coordinated mode of a high-voltage power line

V.A. Kozlov<sup>а</sup>, G.A. Bolshinin<sup>б</sup>

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup>kozlov\_va@bk.ru, <sup>б</sup>bolshaning@mail.ru

Received 6.05.2014, accepted 20.07.2014

*Technical support of coordination of the power line with electrical load to subsequent mode stabilization involves the use of specially selected compensating devices of active and reactive capacity. Basic requirements for compensating devices of active and reactive capacity used for supporting stabilization mode of a power line have been formed. An example of technical basis for the real object has been given. The results of statistical studies of transferring active and reactive capacity for a year over 330 kV power transmission line into one of the industrial areas of the country have also been given. Active and reactive capacities for compensation devices have been determined. It has been shown that compensating devices of installed capacity will provide a coordinated work mode of power lines, at least, for a year. Some errors in the work of compensating devices of active and reactive capacities have been determined. It has been shown that compensating devices of active and reactive capacities work with minimal errors. On the basis of the conducted research it has been concluded that it is worth using selected compensating devices for to implement and stabilize coordinated mode of power line.*

**Keywords:** three-wire power line, coordinated mode, electrical load, incident wave, compensating device.

**Введение.** Одним из методов улучшения качества распределенными параметрами трехфазного трехпроводного исполнения напряжением 220 кВ и выше явля-

ется согласование ЛЭП с электрической нагрузкой [1 – 3]. Условия согласования трехфазных трехпроводных высоковольтных ЛЭП легли в основу ряда изобретений, целью которых является стабилизация согласованного режима работы ЛЭП [4 – 7].

Постановка и решение задачи. Реализация этих условий связана с применением компенсирующих устройств (КУ), устанавливаемых, как правило, на шинах нагрузки.

Пусть в качестве компенсирующего устройства активной мощности (КУАМ) используется гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС). Хотя, в принципе, в качестве КУАМ может быть использован любой другой источник активной мощности, а в качестве компенсирующего устройства реактивной мощности – источник реактивной мощности (КУРМ) (это может быть батарея косинусных конденсаторов). Работа КУ связана с корректировкой активной и реактивной мощностей, передаваемых по ЛЭП нагрузке. Пусть КУАМ и КУРМ условно входят в состав обобщенной нагрузки. Компенсирующие устройства должны работать в заданном диапазоне изменения обобщенной нагрузки. Такое применение КУ для каждой конкретной нагрузки потребует соответствующего обоснования.

На рис. 1 показано, что генератор ГАЭС мощностью 210 МВт может быть потребителем реактивной мощности [8]. Поэтому необходимо учесть возможный, в зависимости от его нагрузочного режима, вклад в формирование величины потребляемой нагрузкой реактивной мощности.

В табл. 1 показано, что два генератора ГАЭС с общей установленной мощностью в 420 МВт могут в ночное время суток на протяжении года потреблять реактивную мощность (табл. 1, столбец 6 (2 G)). Потребление реактивной мощности из сети нагрузки двумя обратимыми гидроагрегатами прекращается (табл. 1, столбец 5) тогда, когда вырабатываемая ими мощность начинает превышать 90 МВт (табл. 1, столбец 4).

По данным табл. 1 на рис. 2 получен график выработки активной  $A, B$  (1) и потребления реактивной  $A, B$  (2) мощностей в течение года в ночное время суток генераторами ГАЭС, установленными на ши-

нах нагрузки.

На рис. 3 показаны установленная мощность КУАМ, установленного на шинах нагрузки (420 МВт) (1) (номинальная мощность КУАМ составила 357 МВт (2)), вырабатываемая мощность КУАМ в течение года в дневное (3) и ночное (4) время суток. Из рис. 3 видно, что КУАМ установленной (1) и номинальной (2) мощности успешно справляются с изменением активной мощности нагрузки в течение года в дневное (3) и ночное (4) время суток.

Судя по данным табл. 1, получается, что нагрузка для КУРМ увеличилась за счет потребления реактивной мощности генераторами КУАМ. В табл. 2 показаны номинальная мощность КУРМ и наибольшая требуемая для нагрузки реактивная мощность, необходимые для обеспечения стабильного согласованного режима работы ЛЭП.

Как известно, с изменением напряжения нагрузки изменяется напряжение генератора (источника питания). Может измениться и его частота. Для контроля частоты вырабатываемого генераторами напряжения следует проследить ее зависимость от величины напряжения генератора.

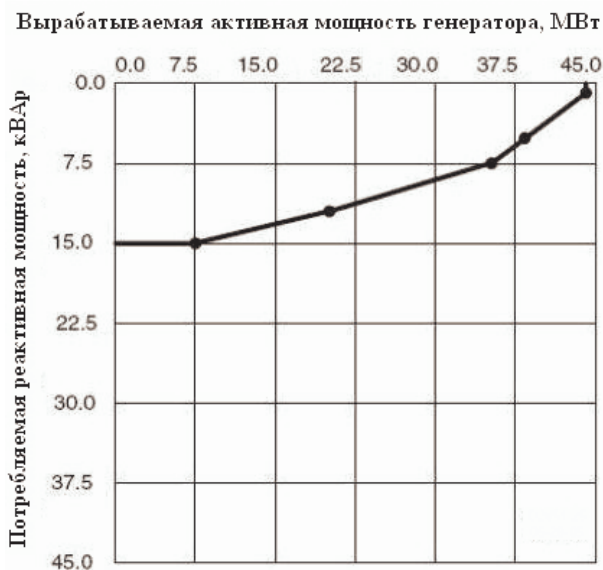


Рис. 1. Кривая потребления реактивной мощности

Таблица 1

## Результаты работы КУАМ (2 гидрогенератора, каждый по 210 МВт)

Активная мощность нагрузки, $Вт$	Наименьшее значение активной мощности, $Вт$	Мощность, вырабатываемая КУАМ, установленного на шинах нагрузки, $Вт$ (420 МВт)	Пороговое значение мощности, после которого гидрогенераторы прекращают потребление реактивной мощности, $Вт$	Величины активной мощности, минус показывает необходимость потребления КУАМ, реактивной мощности, $Вт$ (3) – (4)	Величина реактивной мощности потребляемая КУАМ, $ВАр$ (5) и рис. 1			
1	2	3	4	5	6			
707526328	370233088	337293240	90000000	247293240	0			
715942189		345709101		255709101	0			
678695862		308462774		218462774	0			
616657348		246424260		156424260	0			
624647511		254414423		164414423	0			
664225728		293992640		203992640	0			
687547321		317314233		227314233	0			
707245529		337012441		247012441	0			
629745088		259512000		169512000	0			
662463537		292230449		202230449	0			
696553579		326320491		236320491	0			
727770835		357537747		267537747	0			
437041579				66808491			1 G	2 G
440151965				69918877		-23191509	8000	16000
426472028				56238940		-20081123	7500	15000
398698156				28465068		-33761060	9500	19000
388553403				18320315		-61534932	10375	20750
435293787				65060699		-71679685	14500	29000
473075612				102842524		-24939301	8250	16500
504765366				134532278		12842524	0	0
420629255				50396167		44532278	0	0
370233088				0		-39603833	10250	20500
400753747				30520659		-90000000	0	0
425531532				55298444		-59479341	13000	26000
						-34701556	9500	19000

На рис. 4 представлена зависимость напряжения генератора КУАМ от частоты. Здесь видно, что при изменении напряжения генератора от 100 % до 120 % его частота остается неизменной. Параметры генератора должны допускать возможность изменения напряжения нагрузки в течение года, указанного в табл. 3, где видно, что наибольшее отклонение напряжения нагрузки от своего номинального составляет 16,4 %. В таком случае основная частота напряжения генератора при прогнозируемых изменениях напряжения нагрузки в течение года останется неизменной, поскольку допустимое отклонение напряжения, при котором частота остается неизменной (рис. 4), менее 20 %.

На основании анализа результатов (табл. 3 и рис. 4) напряжение генератора КУАМ (190751,45 В) должно быть изначально увеличено на 16,4 %. Наименьшим из всех напряжений генератора будет напряжение 190751,45 В. При таких диапазонах изменения напря-

жения частота генераторов останется неизменной.

В табл. 4 показаны величины реактивной мощности, которые должно вырабатывать КУРМ, установленное на шинах нагрузки.

На рис. 5, на основании данных табл. 5, приведены установленная и генерируемая мощности КУРМ, установленного на шинах нагрузки (141,75 МВАр) в течение года в дневное (2) и ночное (3) время суток. Здесь видно, что КУРМ полностью компенсирует изменения реактивной мощности нагрузки в течение года в дневное (2) и ночное (3) время суток.

В табл. 5 показаны результаты работы КУРМ на протяжении 2013 года, без учета возможного автоматического управления этими устройствами. При учете этого управления результаты работы КУРМ подлежат корректировке. В табл. 6 приведены результаты работы КУРМ с учетом такой корректировки.

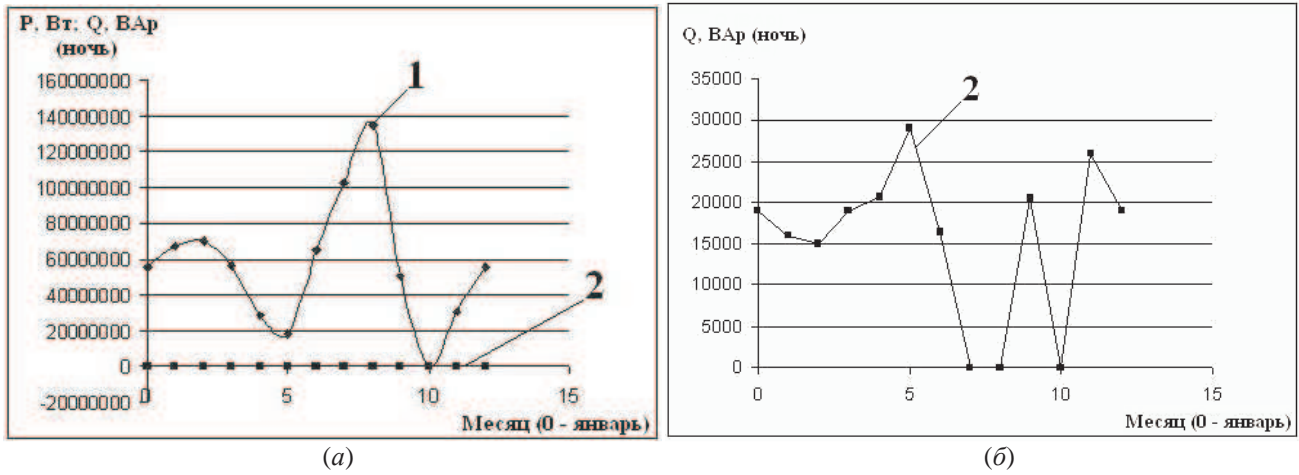


Рис. 2. Генерируемая активная и потребляемая реактивная мощности КУАМ: А – график зависимости величин активной и реактивной мощности от времени года: (1) – активная мощность, вырабатываемая генераторами КУАМ, Вт; (2) – реактивная мощность, потребляемая генераторами КУАМ, ВАр; В – график зависимости величин реактивной мощности от времени года, потребляемой генераторами КУАМ

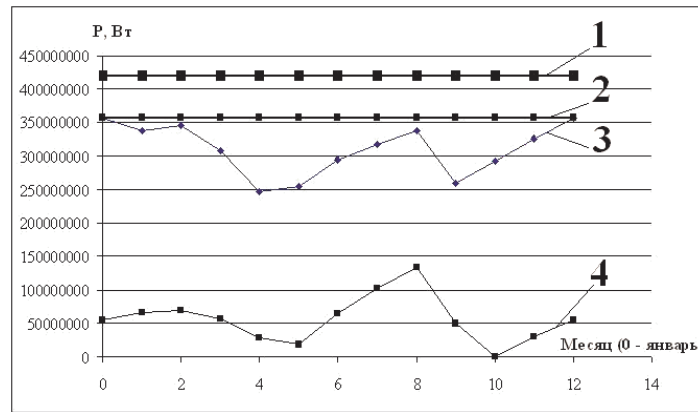


Рис. 3. Мощность КУАМ: 1 – установленная мощность КУАМ (420 МВт); 2 – номинальная мощность КУАМ 420МВт·0,85); 3 – мощность, вырабатываемая КУАМ в течение года (день); 4 – мощность, вырабатываемая КУАМ в течение года (ночь)

Таблица 2

Мощность КУРМ

Номинальная мощность КУРМ, ВАр	Наибольшая потребляемая нагрузкой мощность от КУРМ, ВАр	Остаток по мощности, ВАр (1) – (2)
1	2	3
141750000 (45 шт.)	125138211,5	16611789 (11,72 % от (1) останется в резерве)

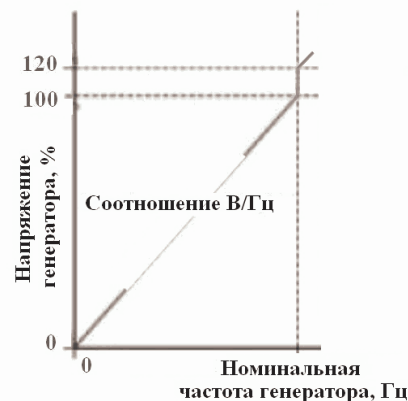


Рис. 4. Зависимость напряжения генератора КУАМ от частоты

Таблица 3

## Результаты работы КУАМ

Фазное напряжение (день), В	Фазное напряжение (ночь), В	Название месяца	Номинальное фазное напряжение генератора на основной частоте, В	Соотношение (1) по отношению к (4), %	Соотношение (2) по отношению к (4), %	Наибольшая величина разницы между (5), (6) и 100 % (4) ( $U_{НОМ} = 190751,45$ ), %
1	2	3	4	5	6	7
173965,32	161375,72	Январь	190751,45 (100 % $U_{НОМ}$ ) (50 Гц)	91	84,59	16,4
172630,06	159468,21	Февраль		90,49	83,59	
177589,59	164046,24	Март		93,09	85,99	
181023,12	169005,78	Апрель		94,89	88,59	
182358,38	170150,29	Май		95,59	89,19	
182358,38	171485,55	Июнь		95,59	89,89	
181023,12	171104,05	Июль		94,89	89,69	
182358,38	173393,06	Август		95,59	90,89	
181595,38	172439,31	Сентябрь		95,19	90,39	
181404,62	167670,52	Октябрь		95,09	87,89	
177017,34	165572,25	Ноябрь		92,79	86,79	
175682,08	163092,49	Декабрь		92,09	85,5	

Таблица 4

## Результаты работы КУРМ

Реактивная мощность нагрузки в течение года, ВАр	Реактивная мощность, потребляемая генераторами активной мощности, ВАр	Реальная реактивная мощность нагрузки, ВАр (1) + (2)	Наименьшее значение реактивной мощности нагрузки в течение года, ВАр	Мощность, которую необходимо выработать КУРМ, ВАр	
1	2	3	4	5	
247634214,8	0	247634214,8	129581580,8	118052634	
250579766,2		250579766,2		120998185,4	
237543551,7		237543551,7		107961970,9	
215830071,8		215830071,8		86248491	
218626628,9		218626628,9		89045048,05	
232479004,8		232479004,8		102897424	
240641562,4		240641562,4		111059981,6	
247535935,2		247535935,2		117954354,4	
220410780,8		220410780,8		90829200	
231862238		231862238		102280657,2	
243793752,7		243793752,7		114212171,9	
254719792,3		254719792,3		125138211,5	
152964552,7		16000		152980552,7	23398971,85
154053187,8		15000		154068187,8	24486606,95
149265209,8		19000		149284209,8	19702629
139544354,6	20750	139565104,6	9983523,8		
135993691,1	29000	136022691,1	6441110,25		
152352825,5	16500	152369325,5	22787744,65		
165576464,2	0	165576464,2	35994883,4		
176667878,1	0	176667878,1	47086297,3		
147220239,3	20500	147240739,3	17659158,45		
129581580,8	0	129581580,8	0		
140263811,5	26000	140289811,5	10708230,65		
148936036,2	19000	148955036,2	19373455,4		

Таблица 5

## Результаты работы КУРМ без шага регулирования автоматической части

Мощность, которую необходимо выработать КУРМ, ВАр	Номинальная мощность КУРМ, ВАр (мощность одного блока КУРМ равна 3,150 МВАр)	Количество участвующих в работе блоков КУРМ, шт. (1)/(2)	Мощность, вырабатываемая КУРМ, ВАр (3) · 3,150 МВАр	Погрешность компенсации по реактивной мощности, ВАр (1) – (4)
1	2	3	4	5
118052634	141750000 (45 блоков)	38	119700000	-1647366
120998185,4		39	122850000	-1851814,65
107961970,9		35	110250000	-2288029,1
86248491		28	88200000	-1951509
89045048,05		29	91350000	-2304951,95
102897424		33	103950000	-1052576
111059981,6		36	113400000	-2340018,45
117954354,4		38	119700000	-1745645,65
90829200		29	91350000	-520800
102280657,2		33	103950000	-1669342,85
114212171,9		37	116550000	-2337828,15
125138211,5		40	126000000	-861788,55
23398971,85		8	25200000	-1801028,15
24486606,95		8	25200000	-713393,05
19702629		7	22050000	-2347371
9983523,8		4	12600000	-2616476,2
6441110,25		3	9450000	-300889,75
22787744,65		8	25200000	-2412255,35
35994883,4		12	37800000	-1805116,6
47086297,3		15	47250000	-163702,7
17659158,45		6	18900000	-1240841,55
0		0	0	0
10708230,65		4	12600000	-1891769,35
19373455,4		7	22050000	-2676544,6

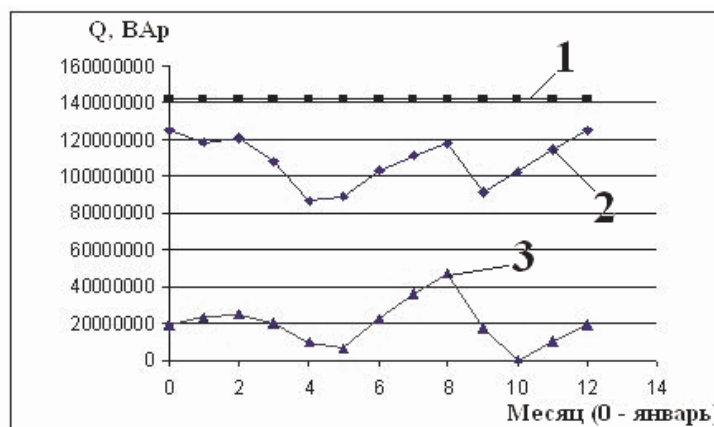


Рис. 5. Реактивная мощность КУРМ: 1 – установленная мощность КУРМ (141,75 МВАр); 2 – мощность, вырабатываемая КУРМ в течение года (день); 3 – мощность, вырабатываемая КУРМ в течение года (ночь)

По данным табл. 6 на рис. 6 показаны величины некомпенсированных реактивных мощностей КУРМ днем (1) и ночью (2) в течение года. На рис. 6 отрицательные значения реактивной мощности иллюстрируют величины реактивной мощности, поставляемые из КУРМ в нагрузку сверх необходимой, обусловленной

условиями согласованного режима работы ЛЭП [1 – 3]. Таким образом, от источника питания по длинной ЛЭП будет передана меньшая величина реактивной мощности. Погрешность работы КУРМ составила менее 1 % от реактивной мощности, которую необходимо скомпенсировать КУРМ (рис. 6).

Таблица 6

## Результаты работы КУРМ с шагом регулирования автоматической части

Мощность, которую необходимо выработать КУРМ, ВАр	Количество участвующих в работе блоков КУРМ, шт.	Нескомпенсированная КУРМ реактивная мощность, потребляемая нагрузкой (знак «минус» показывает величину реактивной мощности, выдаваемой КУРМ в нагрузку сверх необходимой), ВАр	Количество элементов, использованных в автоматической части КУРМ, шт.			
			100 кВАр	5 кВАр	2,5 кВАр	1 кВАр
1	2	3	4	5	6	7
118052634	38	134	15	0	1	0
120998185,4	39	-314,65	12	19	1	1
107961970,9	35	-29,1	8	12	0	2
86248491	28	491	11	19	0	3
89045048,05	29	48,05	8	9	0	0
102897424	33	-76	20	19	1	0
111059981,6	36	-18,45	8	2	0	0
117954354,4	38	354,35	14	0	0	4
90829200	29	200	26	5	0	4
102280657,2	33	-342,85	14	16	0	1
114212171,9	37	-328,15	8	2	1	0
125138211,5	40	-288,55	22	17	1	1
23398971,85	8	-28,15	13	9	0	4
24486606,95	8	-393,05	24	7	0	2
19702629	7	129	8	0	1	0
9983523,8	4	23,8	5	6	1	1
6441110,25	3	110,25	1	8	0	1
22787744,65	8	244,65	7	7	1	0
35994883,4	12	-116,6	13	9	0	0
47086297,3	15	297,3	29	17	0	1
17659158,45	6	-341,55	19	1	1	2
0	0	0	0	0	0	0
10708230,65	4	-269,35	12	11	1	1
19373455,4	7	-44,6	4	14	1	1

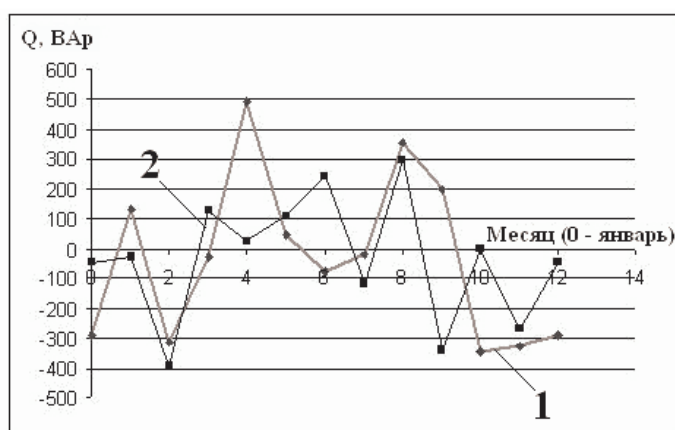


Рис. 6. Погрешность работы КУРМ, фиксируемая на протяжении года: 1 – нескомпенсированная мощность КУРМ в течение года (день); 2 – нескомпенсированная мощность КУРМ в течение года (ночь)

### Выводы

1. Выбранные компенсирующие устройства активной и реактивной мощностей способны реализовать согласованный режим работы трехфазной трехпроводной высоковольтной ЛЭП и поддерживать его в течение года.

2. Выбранные компенсирующие устройства активной и реактивной мощностей работают с минимальными погрешностями, что обеспечивает высокую степень стабильности согласованного режима работы трехфазной трехпроводной высоковольтной ЛЭП.

## Литература

## References

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. Условия согласования симметричного участка однородной трехпроводной линии электрической передачи напряжением 110 кВ и выше с нагрузкой // Материалы за VII международна научна практична конференция «Бъдещето въпроси от света на науката. 2011». София: Бял ГРАД-БГООД, 2011. С. 3-5.
3. Козлов В.А., Большанин Г.А. Условия согласованного режима работы симметричного участка однородной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи 110 кВ и выше // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: материалы II междунар. науч.-техн. конф. студентов., магистрантов., аспирантов. (Тольятти, 24-25 апр. 2012 г.): Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. С. 46-48.
4. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования неоднородной неизолированной трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой: пат. 2502176 Рос. Федерация. № 2012120118/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13, Бюл. № 35. 20 с.
5. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования симметричной четырехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой: пат. 2502177, Рос. Федерация. № 2012120120/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13, Бюл. № 35. 11 с.
6. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой на частотах ярко выраженных гармонических составляющих токов и напряжений: пат. № 2488218, Рос. Федерация. № 2012110296/08; заявл. 16.03.12; опубл. 20.07.13, Бюл. № 20. 16 с.
7. Козлов В.А., Большанин Г.А. Способ согласования трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой: пат. № 2490767, Рос. Федерация. № 2011144668/07; заявл. 03.11.11; опубл. 20.08.13, Бюл. № 23. 9 с.
8. Системы тиристорного независимого возбуждения СТН-ВЕ-350-3000-2-D22WAP0-O4-0 с полным резервированием управляюще-преобразовательных каналов турбогенератора ТВВ-220-2Е Т3: Техническое описание. Basler Electric France SAS. М., 2011. 61 с.
1. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Conditions of coordination of the uniform three-wire high-voltage line of an electricity transmission 10kV above with loading // Materialy VII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Praga: Obrazovanie i Nauka, 2011. P. 86-90.
2. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Conditions of coordination of a symmetric site of the uniform three-wire line of electric transfer by tension 110kV above with loading // Materialy za VII mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya «B'deshcheto v"prosi ot sveta na naukata - 2011». Sofiya: Byal GRAD-BGOOD, 2011. P. 3-5.
3. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Conditions of the coordinated operating mode of a symmetric site of a uniform three-wire high-voltage power line of 110 kV and above // Energieffektivnost' i energobezопасnost' proizvodstvennykh protsessov: materialy II mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov., magistrantov., aspirantov. (Tol'yatti, 24-25 apr. 2012 g.): Tol'yatti: Izd-vo TGU, 2012. P. 46-48.
4. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Way of coordination of a non-uniform uninsulated three-wire power line with electric loading: pat. 2502176 Ros. Federatsiya. № 2012120118/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13, Byul. № 35. 20 p.
5. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Way of coordination of a symmetric four-wire power line with electric loading: pat. 2502177, Ros. Federatsiya. № 2012120120/07; заявл. 15.05.12; опубл. 20.12.13, Byul. № 35. 11 p.
6. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Sposob soglasovaniya trekhprovodnoi linii elektroperedachi s elektricheskoi nagruzkoi na chastotakh yarko vyrazhennykh garmonicheskikh sostavlyayushchikh tokov i napryazhenii: pat. № 2488218, Ros. Federatsiya. № 2012110296/08; заявл. 16.03.12; опубл. 20.07.13, Byul. № 20. 16 p.
7. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Sposob soglasovaniya trekhprovodnoi linii elektroperedachi s elektricheskoi nagruzkoi: pat. № 2490767, Ros. Federatsiya. № 2011144668/07; заявл. 03.11.11; опубл. 20.08.13, Byul. № 23. 9 p.
8. Cistemy tiristorного независимого возбуждениya СТН-ВЕ-350-3000-2-D22WAP0-O4-0 s polnym rezervirovaniem upravlyayushche-preobrazovatel'nykh kanalov turbogeneratora ТВВ-220-2Е Т3: Tekhnicheskoe opisaniye. Basler Electric France SAS. М., 2011. 61 p.