

**ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРОЗОУПОРНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 500 КВ С УСТАНОВКОЙ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ.**

*Маматов Нурланбек Жороевич инженер ОАО "Национальная Электрическая Сеть Кыргызстана", Кыргызская Республика, 720070, г. Бишкек, проспект Жибек Жолу, д.326 эл. почта: [mamatov\\_@mail.ru](mailto:mamatov_@mail.ru), ORCID iD 0000-0002-4597-3557, [nurlan.mamatov59@list.ru](mailto:nurlan.mamatov59@list.ru)*

*Бахышев Икрам Мамедович начальник Центральной Службы Изоляции, Защиты от Перенапряжений и Испытаний электрооборудования, ОАО "Национальная Электрическая Сеть Кыргызстана", инженер Кыргызская Республика, 720070, г. Бишкек, проспект Жибек Жолу, д.326 эл. почта: [bahishev@mail.ru](mailto:bahishev@mail.ru)*

*Колычев Александр Валерьевич доцент кафедры «Электроэнергетика и Техника высоких напряжений» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (С-ПбГПУ), к.т.н. Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29*

**Аннотация**

Проведен расчет показателя грозоупорности линии 500 кВ энергосистемы Кыргызстана при установке на ней нелинейных ограничителей перенапряжений 500 кВ. Показано, что применение ОПН на линии без троса уменьшает число грозовых отключений линии, при этом ОПН увеличивает защиту от грозовых перекрытий изоляции ближайших опор без ОПН.

Приведен в табличной форме расчетные значения грозовых отключений для участка № 2 ВЛ 500 кВ «Токтогульская ГЭС – ПС Фрунзенская» без тросовой защиты и Расчетные значения грозовых отключений для участка № 2 ВЛ 500 кВ «Токтогульская ГЭС – ПС Фрунзенская» без тросовой защиты с применением ОПН.

Исследован распределения токов, протекающих через ОПН при ударе молнии в провод и опору в зависимости от сопротивления заземления опоры, при увеличении сопротивления заземления опоры и при малых сопротивлениях заземления опоры.

Для выбора оптимального способа расстановки ОПН на ВЛ рекомендуется сопоставлять варианты с одинаковым числом ОПН на опоре. На выбор оптимального варианта влияет сопротивление заземления опоры, поэтому, если ограничители применяются для защиты ВЛ по всей длине, целесообразно варьировать схемы расстановки ОПН вдоль трасы зависимости от значений сопротивления заземления опоры на отдельных ее участках.

В работе изложен подход к оценке энергетических воздействий на ОПН рекомендуется в качестве случайных параметров принимать амплитуду и импульсный заряд тока первой и последующих компонент тока молнии. При этом, учет корреляционной связи между амплитудой тока и зарядом обязателен.

Установка ограничителей перенапряжений на ВЛ 500 кВ способствует повышению показателей грозоупорности и снижению числа аварийных отключений высоковольтных воздушных линий.

**Ключевые слова:** Воздушные линия электропередачи 500 кВ, показатель грозоупорности, трос, ограничитель перенапряжений

**THE LIGHTNING RESISTANCE ON AIR LINES OF 500 KV INDICATED BY  
INCREASING WITH INSTALLATION OF OVERVOLTAGE LIMITER ARRESTS.**

*Mamatov N.J. engineer JSC "National Electric Network of Kyrgyzstan ", Kyrgyz Republic, 720070, Bishkek c., Zhibek - Zholu av.326 E-mail: [mamatov\\_@mail.ru](mailto:mamatov_@mail.ru), ORCID iD 0000-0002-4597-3557, [nurlan.mamatov59@list.ru](mailto:nurlan.mamatov59@list.ru)*

*Bahyshev I.M. Head of the Central Service of Isolation, Protection from Overvoltage's and Electrical Trials, JSC "National Electric Network of Kyrgyzstan", engineer, Kyrgyz Republic, 720070, Bishkek c., Zhibek - Zholu av.326 E-mail: bahishev@mail.ru*

*Kolychev A.V. Associate Professor of the Department of "Power and High Voltage Engineering" of the St. Petersburg State Polytechnic University, c.t.science Russia, 195251, Sanct-Peterburg c., Politechnic s. 29*

**Abstract.** This report, presents the calculation of the lightning resistance of the 500 kV transmission line in the Kyrgyz energy system after the installation of non-linear 500 kV overvoltage arresters on it. It is shown, that application of surge arresters on a line without a cable reduced the number of lightning line trips. At the same time, surge arresters increases protection from lightning overlapping isolation.

The calculation values was given in table form of the lightning outage for the site of №2 of air line 500 kV "Toktogul GES-PS Frunze" without protection cable and checking account of the lightning outage for the site of №2 of air line 500 kV "Toktogul GES-PS Frunze" with applying of surge arresters.

The distribution of current was explored, while surge arresters striking at lightning to the wire and ground support depending on the resistance. The resistance of the ground supports to distribute with the increase in small resistance support.

Surge arresters on air line arranged in optimal way which recommended matching the variants with the same surge arrester numbers on the support. For optimal variant of choice is influence ground resistance of the support, therefore, if the limiters are used to protect the air line along the entire length, it is advisable the schemes of placing surge arresters to vary along the route depending on the values of the ground resistance of the support in its individual sections.

In this work an approach is to estimate power influences on surge arresters, which recommended taking amplitude and the impulse charge of the current of the first and subsequent components of the lightning current as random parameters. By taking account into the correlation between the amplitude of the current and the charge is mandatory.

The installation of overvoltage limiters at air line of 500 kV contributes increasing in the lightning resistance and a reduction in the number of emergency outages of high-voltage overhead lines.

**Key words:** 500 kV overhead line, lightning protection, cable, overvoltage limiter

Снижение числа аварийных отключений высоковольтных воздушных линий является важной задачей современной электроэнергетики. В последнее время в Кыргызстане защиту воздушных линии электропередачи (ВЛ) от грозových перекрытий стали осуществлять с помощью линейных защитных аппаратов (ЛЗА). Целесообразность применения ЛЗА бесспорна, когда традиционные мероприятия не дают желаемого результата (приемлемой величины числа грозových отключений при заданных грозовой интенсивности и длине линий).

Они применяются во многих странах мира (России, Японии, США и др.) на линиях классов напряжения от 6 до 500 кВ [2]. Опыт эксплуатации ВЛ 500 кВ «Токтогульская ГЭС- Фрунзенская» с установкой ограничителей перенапряжений (ОПН) подтвердили свою надежность и эффективность в качестве радикального средства защиты ВЛ от грозových перекрытий и аварийных отключений. За истекший период с 2012 по 2016 г. линия не имела ни одного аварийного отключения.

Применение ЛЗА, в частности подвесных ОПН на (ВЛ) должно осуществляться при проведении соответствующих расчетов и технико-экономического обоснования. Обладая полной информацией о характеристиках ВЛ (сопротивление заземления опор, высотная характеристика трассы ВЛ, наличие геологических разломов, поражаемости

молнией опор) можно существенно уменьшить количество применяемых ОПН, обеспечивая высокую эффективность грозозащиты [2]. Рассмотрим этот вопрос на примере ВЛ 500 кВ республики Кыргызстан.

Число отключений ВЛ 500 кВ на бестросовом участке № 2 «Токтогульская ГЭС – ПС «Фрунзенская» из-за ударов молнии в фазные провода в среднем составляет 8,6 откл. на 100 км/год, вместо 1,1 откл. на 100 км по РД [9] или 0,15 грозовых отключений на 100 км, если бы участок имел трос по всей длине, или 0,63 откл. на 100 км – эксплуатационного показателя для ВЛ-500 кВ Кыргызстана. Поэтому, на первом этапе необходимо добиться нормализации работы участка № 2 Л509 по грозовым отключениям, привести количество грозовых отключений к показателям, требуемым РД [9].

При расстановке подвесных ОПН на участке № 2 необходимо учитывать неравномерность распределения числа грозовых отключений по участку[5]. В табл.1 представлены значения отключений ВЛ 500 кВ при ударе молнии в провод и опоры на 100 км/год по расчетным частям участка № 2. Наибольшее количество отключений происходит на второй и третьей расчетной части. Поэтому, наибольшее количество ОПН должно быть установлено в пределах этих частей. Суммарное количество отключений на четвертой части участка не превосходит 0,288 отключений на 100 км /год. Установка ОПН на этой части участка № 2 может быть оправдана, если необходимо достигнуть эксплуатационного показателя отключений ВЛ 500 кВ – 0,63 отключений на 100 км/год.

Для линий без троса расчетными случаями являются удар молнии в провод и опору (рис.1.). При ударе молнии в провод грозовая волна распространяется в две стороны от точки удара молнии. Через ОПН, установленный между фазным проводом и телом опоры, протекает импульсный ток (рис.1). Напряжение, воздействующее на линейную изоляцию опоры, в этом случае будет ограничено остающимся напряжением на ограничителе, практически не зависящим от сопротивления заземления опоры.

Амплитуда отраженной от ОПН волны, распространяющейся с обратным знаком в сторону места удара молнии, а также преломленной волны, зависят от многих факторов[3]. Напряжение на опоре равно значению преломленной волны и равно сумме напряжений – остающегося напряжения на ОПН и падения напряжения на сопротивлении заземления опоры и части индуктивности опоры. При увеличении сопротивления заземления опоры также увеличивается напряжение на опоре и амплитуда преломленной волны, но значение падения напряжения на ОПН, и соответственно, напряжение на изоляции, зависит только от протекающего через ОПН импульсного тока. Волновые процессы, происходящие в этом случае, могут быть описаны с помощью метода бегущих волн[6].

**Таблица 1**

Расчетные значения грозовых отключений для участка № 2 ВЛ 500 кВ «Токтогульская ГЭС – ПС Фрунзенская» без тросовой защиты

Номер расчетной части участка	I	II	III	IV	Участок № 2
Допустимое число откл. ВЛ по расчетным частям на 100 км/год	0,275	0,275	0,275	0,275	1,1
Расчетное число откл. ВЛ при ударе молнии в провод на 100 км/год	0,595	2,377	5,347	0,27	8,6
Расчетное число откл. ВЛ при ударе молнии в опору на 100 км/год	0,113	0,113	0,254	0,013	0,493
Расчетное число откл. ВЛ на 100 км/год	0,708	2,49	5,60	0,288	9,09

Необходимая эффективность гроззащиты ОПН участка, %	53,8	88,4	94,9	0	87,9
---	------	------	------	---	------

Рассмотрим ВЛ в однолинейной схеме замещения (рис.2), в одну из фаз которой ударяет молния (например, в фазу «А»). На этом рисунке  $Z_{пр}$  – волновые сопротивления провода с учетом короны.

Для напряжения и токов в точке установки ОПН воспользуемся правилом эквивалентной волны для узловой точки с нелинейным сопротивлением молнии [1].

$$u_2 + i_2 \cdot Z_{\Sigma} = i_M \cdot Z_{\Sigma} + \sum_{j=2}^3 \frac{2 \cdot u_{j2}}{Z_j} \cdot Z_{\Sigma},$$

где через  $Z_{\Sigma}$  обозначено параллельное соединение волновых сопротивлений линий, в том числе и молнии;  $u_{j2}$  - волны напряжения приходящие к узлу 2;  $i_2$  - ток стекающий в землю.

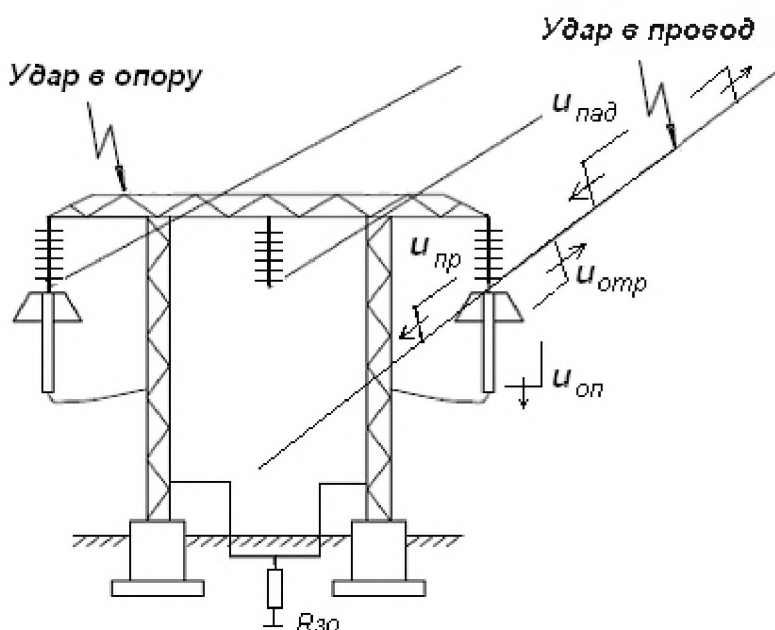


Рис.1. Расчетные случаи при ударе молнии в ВЛ без троса

Так как набегающие волны по линиям 2 и 3 отсутствуют, то  $i_M = i_2$ . напряжения  $e$  в узле 2 (на опоре) состоит из суммы напряжений:

$$u_2 = u_{опн} + u_{L2} + u_{R_{зз}}.$$

Форма падающей грозовой волна  $u_{12}$  и ее амплитуда определяется формой и амплитудой тока молнии. При равенстве волновых сопротивлений

$$Z_{пр2} = Z_{пр3} = Z_{пр} \quad \text{подающая волна равняется } u_{12} = \frac{i_M}{2} \cdot Z_{пр}.$$

Эквивалентная схема замещения для расчетов токов и напряжений при установке одного ОПН на опоре представлена на рис.3. Аналогичные схемы можно построить при использовании двух и более ОПН на опоре.

Исследования распределения токов, протекающих через ОПН при ударе молнии в провод и опору в зависимости от сопротивления заземления опоры,

представлены на рис.4, где показаны значения тока, протекающего через ОПН1 отнесенные к среднестатистическому току молнии для высокогорной местности  $I_M = 14,96$  кА, при ударе молнии в провод и опору.

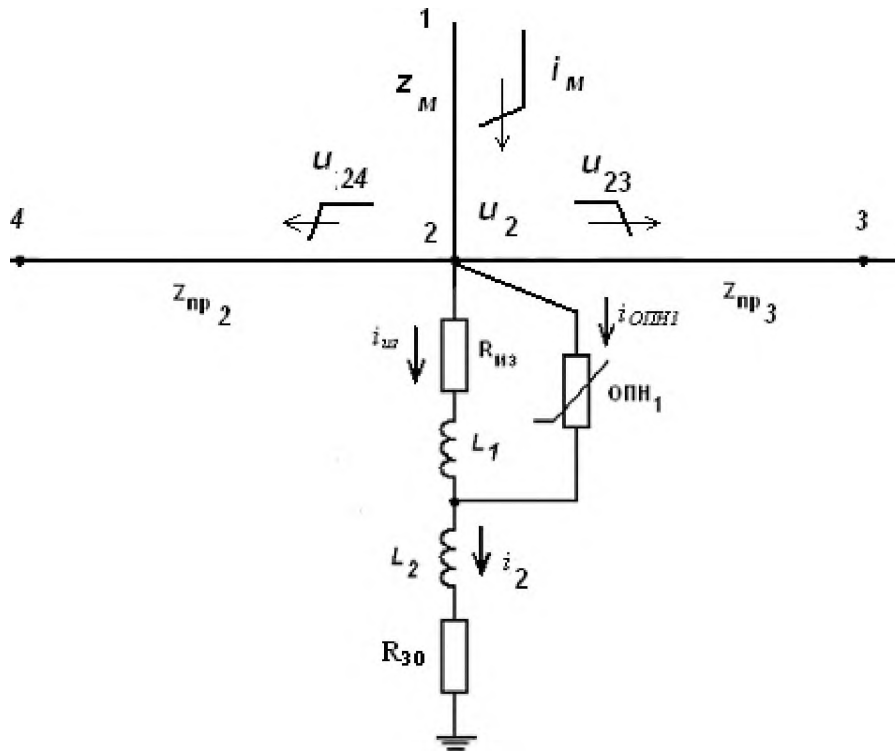


Рис.2. Однолинейная схема замещения трехфазной электропередачи с ОПН на опоре для расчета волновых процессов при ударе молнии в провод.

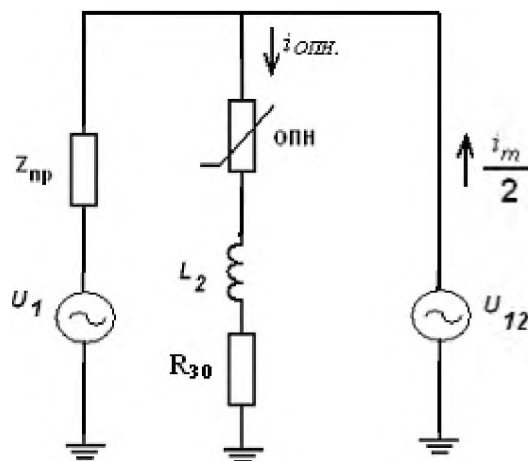


Рис.3. Схема для расчета импульсных токов через ОПН и напряжений при ударе молнии в провод и установке одного ОПН на опоре:  $R_{з0}$  – сопротивление заземления опоры  $L_2$  – индуктивность нижней части опоры, относительно точки подсоединения ОПН;  $Z_{пр}$  – волновое сопротивление провода;  $U_1$  – рабочее фазное напряжение провода 1

Как видно из рис.4, при малых сопротивлениях заземления опоры наибольшие токи через ОПН протекают при ударе молнии в провод. Их величина не превышает 40% процентов от амплитуды тока молнии в месте ее удара в провод, а среднее значение при напряжении на проводе  $U_2 = 0$  кВ составляет 25% от амплитуды. Наибольшие импульсные токи протекают через ОПН, установленный на пораженной молнией фазе. Через второй ОПН, соединенный с непораженным молнией проводом, протекают незначительные

импульсные токи. Фактически, при ударе молнии в провод работает только один ОПН, соединенный с пораженной молнией фазой [5].

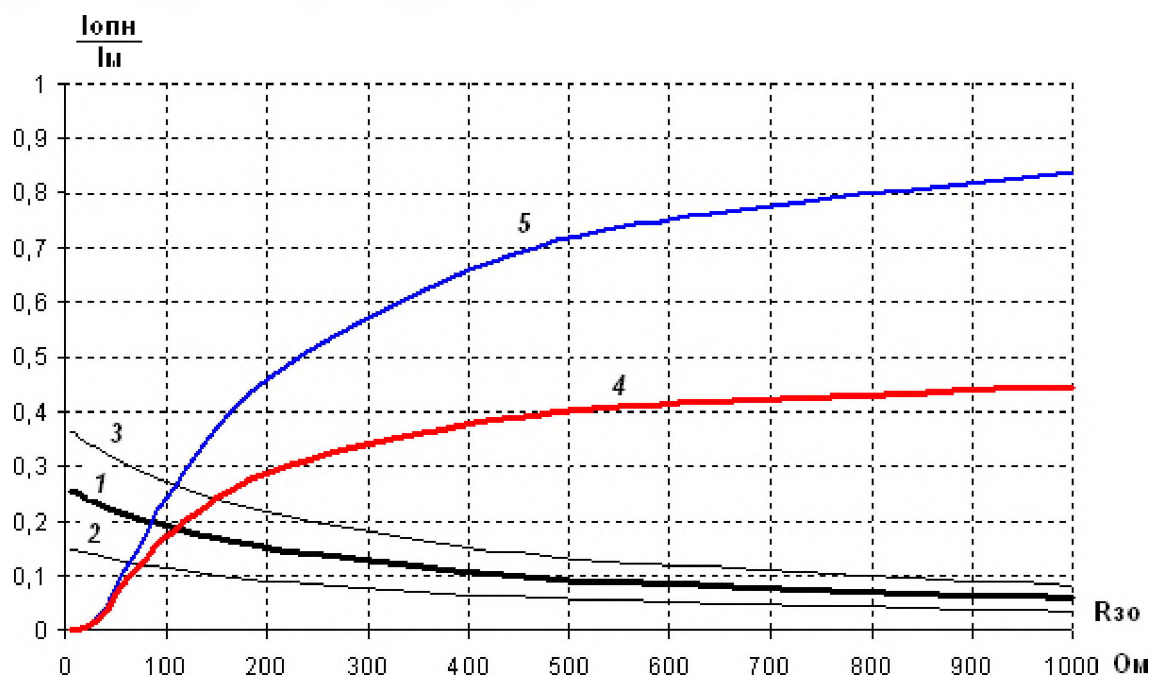


Рис.4. Зависимость тока через ОПН1 от сопротивления заземления опоры при амплитуде тока молнии  $I_M=14,96$  кА. Кривые 1, 2 и 3 при ударе молнии в провод; 4, 5 – при ударе в опору:

1 – при  $U_1 = 0$  кВ; 2 – при  $U_1 = - 428$  кВ (напряжение провода совпадает по полярности с импульсом тока молнии); 3 – при  $U_1 = + 428$  кВ; 4- при установке на опоре двух ОПН; 5 – при установке на опоре одного ОПН

При увеличении сопротивления заземления опоры наибольшие токи через ОПН протекают при ударе молнии в опору. При  $R_{30}$  менее 100 Ом импульсные токи через ОПН не превышают 30% от амплитуды тока молнии.

При  $R_{30}$  свыше 200 Ом и установке ОПН на одной фазе, ток, протекающий через ОПН, возрастает до 50% от  $I_M$  и до 80% при  $R_{30}$ , равном 1000 Ом. При установке на опоре в двух фазах ограничителей, при ударе молнии в опору токи через ОПН не превышают 50% от значений  $I_M$ .

Напряжение на опоре и, соответственно преломленная и отраженная волны, зависят от величины сопротивления заземления опоры. Поэтому, на участках с высокими сопротивлениями заземления опор необходимо использовать спаренную расстановку ОПН – на соседних опорах на одних и тех же фазах.

В таблице 3[5] представлены результаты расчетов эффективности применения ОПН, их количества при расстановке на расчетных частях участка № 2. Применение 54 фаз ОПН снизит число грозовых отключений участка № 2 на 88% и составит 1,06 откл. на 100 км/год [5].

Таблица 3

Расчетные значения грозовых отключений для участка № 2 ВЛ 500 кВ «Токтогульская ГЭС – ПС Фрунзенская» без тросовой защиты с применением ОПН

Номер расчетной части участка	I	II	III	IV	Участок № 2
Допустимое число откл. ВЛ по расчетным частям на 100 км/год	0,275	0,275	0,275	0,275	1,1

Число опор на участке	6	10	12	32	60
Число ОПН на участке	6	20	28	-	54
Расчетное число откл. ВЛ без ОПН на 100 км/год	0,708	2,49	5,60	0,288	9,09
Расчетное число откл. ВЛ с ОПН на 100 км/год	0,294	0,276	0,219	0,274	1,06
Эффективность грозозащиты с ОПН участка, %	60	88,4	95,9	5	88,26

### Выводы

Для выбора оптимального способа расстановки ОПН на ВЛ рекомендуется сопоставлять варианты с одинаковым числом ОПН на опоре. На выбор оптимального варианта влияет сопротивление заземления опоры, поэтому, если ограничители применяются для защиты ВЛ по всей длине, целесообразно варьировать схемы расстановки ОПН вдоль трасы зависимости от значений сопротивления заземления опоры на отдельных ее участках.

В работе изложен подход к оценке энергетических воздействий на ОПН рекомендуется в качестве случайных параметров принимать амплитуду и импульсный заряд тока первой и последующих компонент тока молнии. При этом, учет корреляционной связи между амплитудой тока и зарядом обязателен.

### Список литературы

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 280 с.
2. Бахышев И.М, Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Показатели грозоупорности ВЛ 500 кВ при установке на ней нелинейных ограничителей перенапряжений 500 кВ.
3. Костенко М.В. Обобщенное правило эквивалентной волны для многопроводных линий. Электричество, 1985 г., № 12, с. 16-21.
4. Маматов Н.Ж., Бахышев И.М. Разработка технических мероприятий по повышению грозоустойчивости на линиях электропередачи 220 кВ.
5. Отчёт АО «Пазитрон» «Анализ грозозащиты ВЛ 500 кВ Токтогульская ГЭС-Фрунзенская». Санкт-Петербург. 2009г. .
6. Правило эквивалентной волны для узловой точки с нелинейным сопротивлением молнии. М.В.Костенко, Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. М.: Энергоатомиздат 1989 г.
7. Правила устройства электроустановок. Шестое издание, переработанное и дополненное. Энергоатомиздат, 1985.
8. Правила эквивалентной волны для узловой точки с нелинейным сопротивлением молнии. М.В.Костенко, Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. М.: Энергоатомиздат 1989 г.
9. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД153-34.3-35.125-99. Санкт-Петербург. Издательство ПЭИПК, 1999.

**Известия КГТУ им. И.Раззакова 45/2018**

---

10. Руководящие указания по защите сетей 6–500 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. Бишкек, 1997