

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАВЕДЁННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ 110-500 кВ

Леднев В.В., Андронов В.А., Нестеров С.В., Целебровский Ю.В.

Приведены результаты по исследованию наведенных напряжений на ВЛ различных классов напряжения. Показана методика проведенных опытов. Даны рекомендации, позволяющие организовать безопасную работу на ВЛ.

Перечень линий, которые находятся под наведённым напряжением, предусмотренный пунктом 4.15.43 Межотраслевых правил по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПОТ Р М) [1] составляется на основе измерений. Для таких измерений фирмой ОРГРЭС были составлены Методические указания [2], которые определили «*порядок выполнения измерений наведённых напряжений на проводах ВЛ под наведённым напряжением при отключении и заземлении их по концам (в РУ) и на рабочих местах*»¹. Отметим сразу, что это не вполне соответствует требованиям ПОТ Р М, определяющим ВЛ под наведённым напряжением как линию, где имеется напряжение выше 25 В «*при различных схемах заземления (а также при отсутствии заземлений)*».

Целью настоящей работы было проведение измерений как в соответствии с ПОТ Р М, так и напряжений прикосновения, которые позволили бы оценить возможные опасности, возникающие при выполнении различных операций, предусмотренных технологическими картами и проектами производства работ на ВЛ, находящихся под наведённым напряжением.

Прежде чем переходить к методикам таких измерений остановимся кратко на составе и описании возможных опасностей. Возникновение наведённого напряжения на проводах отключённых ВЛ и у заземлённых опор обусловлено тремя видами воздействия: ёмкостным влиянием, индуктивным влиянием, кондуктивным влиянием [3].

Ёмкостное влияние создаёт опасность при прикосновении к незаземлённому и плохо заземлённому проводу отключённой ВЛ, особенно, на отключённой цепи двухцепной ВЛ. Напряжение, возникающее при ёмкостном влиянии, не зависит от тока влияющей ВЛ, а зависит только от её номинального напряжения и полностью исчезает после надёжного (с малым сопротивлением) заземления отключённой ВЛ хотя бы в одной точке. При этом сопротивление заземления должно быть тем меньше, чем больше длина ВЛ. В [4] приводятся данные для двухцепных ВЛ 110 и 220 кВ, показывающие, что при сопротивлении заземления менее 30 Ом напряжение снижается до безопасного на отключённой цепи ВЛ 110 кВ длиной 60 км и на отключённой цепи ВЛ 220 кВ длиной 30 км. Далее мы покажем, что при больших сопротивлениях заземления (например, при одиночном заземлении на штырь глубиной 0,5 м) ёмкостное влияние не исчезает.

При индуктивном влиянии возникает три вида опасности:

- Прикосновение к незаземлённому проводу; включая случай непредвиденного разземления провода, заземлённого в одной точке.
- Прикосновение к проводу, заземлённому в одной точке, в любом месте линии, исключая точку заземления.

¹ Пункт 1.2 Методических указаний [2]. Здесь и далее курсивом в кавычках выделяются фразы, цитируемые по документу.

- Попадание под высокие значения напряжений прикосновения к заземленным частям (опоры ВЛ, заземлённые механизмы и автотранспорт, контактирующие с проводом), при заземлении ВЛ в нескольких точках. Высокие напряжения могут возникнуть при коротких замыканиях влияющей линии, повышенном сопротивлении заземления и отсутствии выравнивания и (или) уравнивания потенциалов.

Кондуктивное влияние возникает при обрыве провода на действующей ВЛ. Как правило, действующая ВЛ имеет то же или более высокое напряжение, чем отключённая. Если отключённая ВЛ не заземлена, то на её проводе возникает полное фазное напряжение влияющей ВЛ. При заземлении отключённой ВЛ возникают опасности, аналогичные опасностям при однофазных коротких замыканиях (КЗ) на действующих ВЛ. Сопротивления заземления опор ВЛ, как правило, не обеспечивают электробезопасности при КЗ на ВЛ. Напряжения прикосновения всегда оказываются выше допустимых. Если не принимать во внимание малую вероятность такого случая, то он оказывается наиболее опасным из-за недопустимо больших напряжений прикосновения к заземлённым опорам и механизмам. При разработке методики и проведении измерений этот случай не рассматривался (из-за малой вероятности).

Таким образом, при ёмкостном и кондуктивном влияниях человек может попасть как под полное напряжение, так и под напряжение прикосновения².

Попадание под полное наведённое напряжение возможно при:

- нахождении человека на опоре и касании им провода (троса) не заземленного на эту опору;
- нахождении человека в заземлённой люльке подъёмного механизма и одновременном касании незаземлённого провода;
- касании человеком, находящимся на земле, проводящего фала, спускаемого с изолированной люльки подъёмного механизма, соединённой с проводом;
- нахождении человека на земле (заземлённой раме оборудования) и касании незаземлённого на подстанции провода ВЛ.

Попадание под напряжение прикосновения возможно при:

- прикосновении человека к опоре, на которую заземлён провод;
- прикосновении человека к подъёмному механизму с заземлённой и присоединённой к проводу люлькой (в том числе вход и выход из кабины подъёмного механизма);
- касании человеком, находящимся на земле, проводящего фала, спускаемого с заземлённой люльки подъёмного механизма, соединённой с проводом;
- нахождении человека на земле и касании конструкции, на которую заземлены провода ВЛ на подстанции (при отсутствии металlosвязи с заземляющим устройством подстанции).

Эти исходные положения были положены в основу экспериментальных работ на ВЛ, которые проводились в 2006-2007 гг. в филиале «Сарбайские МЭС» АО «KEGOC».

Рассмотрим вначале методику измерений. Измерения включали в себя:

1. Измерение напряжения на проводе отключённой ВЛ при заземлённом и разземлённом положениях провода в точке измерения.
2. Измерение напряжения на заземляющем устройстве опоры ВЛ при заземлении провода на опору и измерение ожидаемых напряжений прикосновения.

1. Измерение напряжения на проводе.

Напряжения на проводе отключённой линии, находящейся под наведённым напряжением, могут достигать сотен и даже тысяч вольт, а при коротких замыканиях в сети – десятков тысяч вольт. Измерения таких напряжений возможны при помощи понижающих трансформаторов, а также с помощью делителей напряжения. Понижающие трансформаторы должны иметь изоляцию между обмотками, выдерживающую ожидаемые напряжения, и напряжение

² *Полное наведённое напряжение* – разность потенциалов между проводом и удалённой землёй (зоной нулевого потенциала, см. 1.7.20 ПУЭ, 7-е изд.). *Ожидаемое напряжение прикосновения* – разность потенциалов между проводящей частью, которой может прикоснуться человек, и землёй, в месте возможного расположения стоп ног человека (см. также 1.7.24. ПУЭ, 7-е издание).

первичной обмотки – не менее 10 кВ. Применительно к рассматриваемым измерениям трансформаторы имеют следующие недостатки:

- Заметную массу, исключаящую подъем трансформатора на опору. Это требует применения проводов с высоковольтной изоляцией для соединения трансформатора, установленного на уровне земли, с проводом.
- Малую точность измерения при заметном отличии измеряемого напряжения от номинального.

Основным недостатком делителя напряжения является отсутствие серийно выпускаемых делителей для измерений наведённого напряжения. Вместе с тем делитель имеет явные преимущества перед трансформатором, которые состоят в следующем:

- небольшая масса, позволяющая подсоединять делитель к проводу непосредственно на опоре (в люльке подъёмного механизма);
- обеспечение необходимой точности измерений при любых первичных напряжениях;
- безопасное подсоединение и отсоединение делителя при помощи совмещённой с делителем изолирующей штанги.

С учетом этих преимуществ был выбран путь разработки и изготовления специального делителя для измерения наведённых напряжений. Делитель представляет собой трубчатое устройство, показанное на рис. 1.

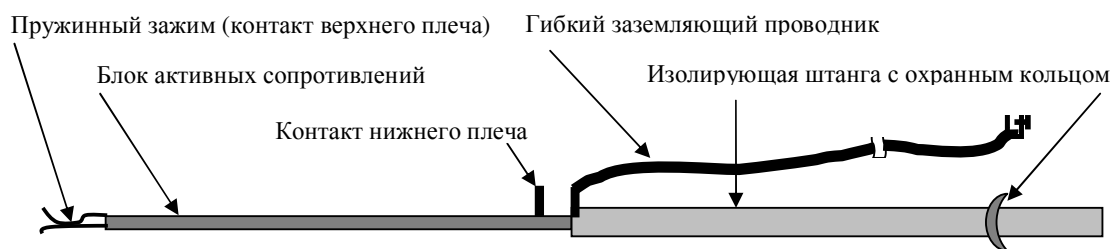


Рис.1 Измерительная штанга-делитель

Блок активных сопротивлений представляет собой трубку из стеклотекстолита с расположенными внутри трубки резисторами (с единичной мощностью 2 Вт), соединёнными последовательно и залитыми эпоксидным компаундом. Суммарное сопротивление верхнего плеча делителя составляет 9570 кОм, нижнего – 330 кОм. Верхнее плечо подсоединяется к проводу, на котором измеряется напряжение, с помощью пружинного зажима. Блок активных сопротивлений крепится к изолирующей штанге, имеющей охранный элемент. Нижний конец блока активных сопротивлений заземляется. Измерительная штанга-делитель предназначена для работ под напряжением до 10 кВ и её изолирующая часть испытана напряжением 48 кВ.

Схема измерения наведённого напряжения при помощи делителя представлена на рис. 2.

Перед началом измерений нижний конец резистивного блока делителя подсоединяется к опоре или к переносному заземлению (ПЗ), установленному между опорой и проводом, на котором необходимо измерить наведённое напряжение (фазный провод или грозозащитный трос). К нижнему плечу делителя подсоединяется вольтметр. Для измерения делитель при помощи изолирующей штанги подсоединяется к фазному проводу или тросу. Снимается переносное заземление с провода. Производится измерение напряжения нижнего плеча вольтметром, которое затем умножается на коэффициент делителя. Если полученное в результате умножения напряжение не превышает 25 В, для повышения точности измерений его можно измерить непосредственно вольтметром. Для этого вновь накладывается переносное заземление, вольтметр отсоединяется от нижнего плеча делителя и на нём устанавливается необходимый предел измерения. Затем вольтметр подсоединяется к проводу и переносному заземлению. Заземление снимается и производится отсчёт напряжения.

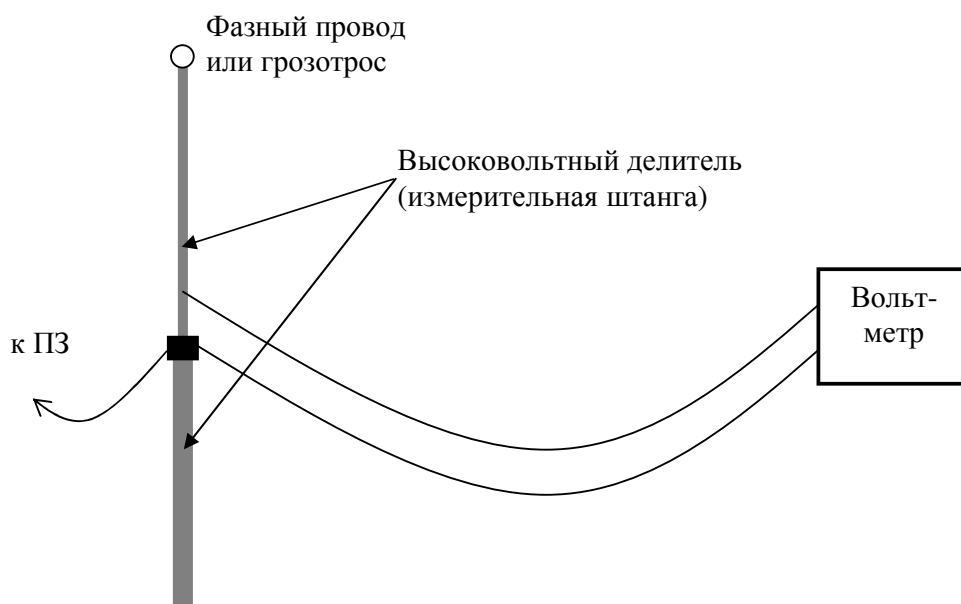


Рис.2 Измерение наведённого напряжения при помощи делителя

2. Измерение напряжения на заземляющем устройстве.

Измерение напряжения производится или на заземляющем устройстве опоры, на которую заземлён провод или на заземляющем устройстве подъёмного механизма, при работе в середине пролёта. Измерение напряжения производится по схеме, показанной на рисунке 3.

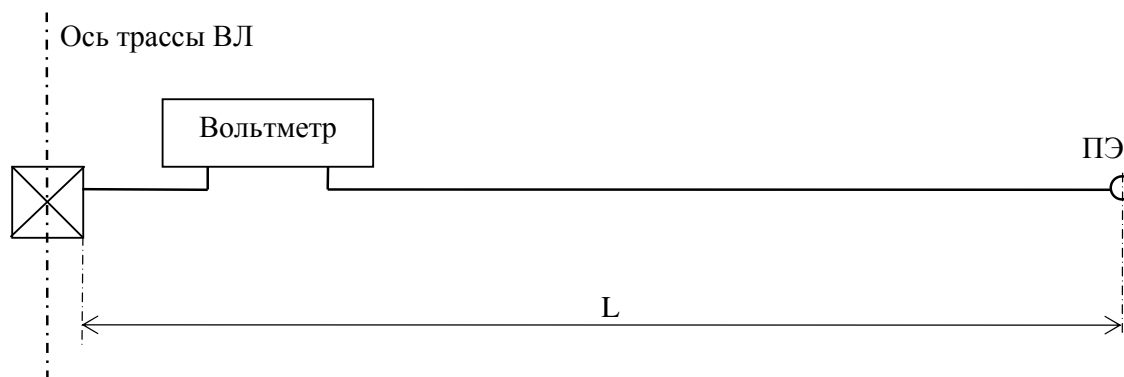


Рис.3 Измерение напряжения на заземляющем устройстве

Для определения тока, стекающего с опоры в землю, необходимо провести его непосредственное измерение токоизмерительными клещами в переносном заземлении, установленном между проводом и опорой. Дополнительные сведения может дать измерение сопротивления заземления опоры. Измерение сопротивления заземления производится при снятом с проводов переносном заземлении. Измерение производится по схеме, показанной на рисунке 4.

Расстояние L должно составлять не менее 4-х – 5-и горизонтальных размеров фундаментной части опоры. Рекомендуется принимать его равным 50 м, а для порталных опор и опор с оттяжками – при необходимости увеличивать.

Ток $I_{изм}$, стекающий с опоры в землю при заземлении на опору провода или троса, определяется по выражению:

$$I_{изм} = \frac{U_{зy}}{R_{зy}},$$

где: $U_{зy}$ – напряжение, измеренное по схеме рис.3; $R_{зy}$ – сопротивление, измеренное по схеме рис. 4. Вычисленный таким образом ток сравнивается со значением, измеренным токоизмерительными клещами. Способ определения тока через напряжение и сопротивление заземления особо необходим там, где ток небольшой и токоизмерительными клещами измеряется плохо.

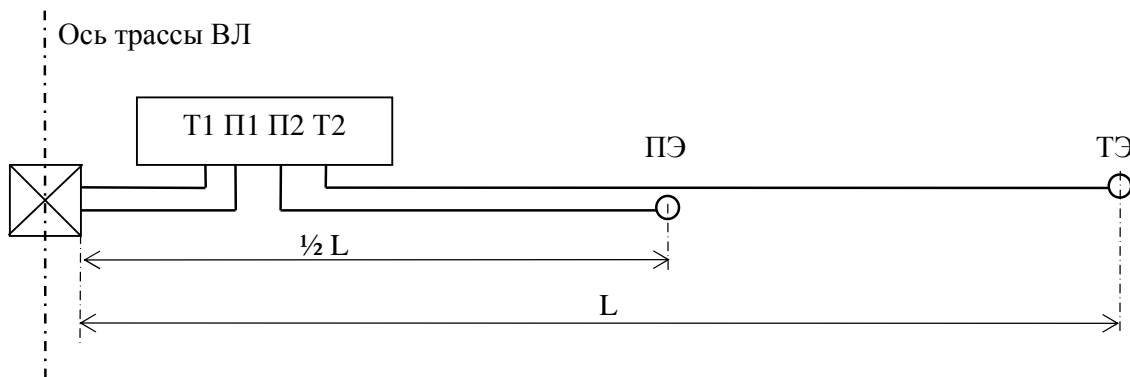


Рис. 4. Схема взаимного расположения электродов при измерении сопротивления опоры

Ток, стекающий с заземлителя опоры в нормальном режиме работы ВЛ, необходим для оценки напряжения на заземляющем устройстве опоры при коротком замыкании во влияющей сети с током $I_{кз}$. Это определение производится по выражению;

$$U_{зy кз} = U_{зy} \frac{I_{кз}}{I_{изм}}$$

Измерение ожидаемых напряжений прикосновения описано в [5].

Работы выполняются в соответствии с требованиями ПОТ Р М, инструкций по эксплуатации приборов и с использованием средств защиты.

Работать с автовышки следует стоя на дне корзины, закрепившись стропом предохранительного пояса. Рама автовышки должна быть заземлена до начала работ. Заземление автовышки следует выполнять контурным. Контурное заземление представляет собой 4 вертикальных электрода (штыря), которые забиваются в грунт на глубину 0,5-0,7 м в углах контура, охватывающего автовышку. Штыри должны быть соединены гибким медным проводником сечением не менее 25 мм², который должен лежать на поверхности земли, на расстоянии 0,5...1 м от автовышки.

Запрещается выполнение работ во время дождя. При приближении грозы все работы по измерению наведенного напряжения должны быть прекращены.

На основе описанной методики разработан проект типовой технологической карты по измерению наведённых напряжений.

Рассмотрим теперь результаты измерений. В таблицах 1 и 2 приводятся результаты совместных измерений НГТУ и Сарбайских МЭС. В таблице 1 показаны напряжения, наведённые на отключённой и незаземлённой ВЛ, а также напряжения при заземлении в одной точке (в месте измерений) при разных сопротивлениях заземления.

Как видно из таблицы, в случае полного разземления ВЛ наведённое напряжение содержит ёмкостную и индуктивную составляющие. При заземлении в одной точке ёмкостная составляющая исчезает; напряжение на заземлителе определяется сопротивлением заземления и ёмкостным током через заземлитель. Можно видеть, что в нормальном режиме влияющих ВЛ это напряжение составляет вольты, а при коротких замыканиях может на рассматриваемых ВЛ достигать сотен вольт.

В отличие от разземлённой по концам ВЛ, линия, заземлённая по концам, имеет значительно более низкие наведённые напряжения (табл.2). Во всех случаях наведённое напряжение в месте измерения составляет вольты.

Таблица 1

Наведённые напряжения на ВЛ, разземлённой по концам

№ п/п	Наименование ВЛ	Наведённое напряжение, В			
		Без заземления в точке измерения	Заземлен на заземлитель опоры	Заземлён через сопротивление 5 Ом	Заземлён через сопротивление 100 Ом
1	Л 2186 «Есиль-Челгаши»	217	0,12	0,21	3,6
2	ВЛ220 «Сокол-Заречная»	749	0,25	0,39	1,8

Таблица 2

Наведённые напряжения на ВЛ, заземлённой по концам

№ п/п	Наименование ВЛ	Наведённое напряжение, В			
		Без заземления в точке измерения	Заземлен на заземлитель опоры	Заземлён через сопротивление 5 Ом	Заземлён через сопротивление 100 Ом
1	Л 2186 «Есиль-Челгаши»	1,7	0,8	1,1	1,7
2	ВЛ220 «Сокол-Заречная»	21	3,0	4,7	21

Здесь следует обратить внимание на тот факт, что к заземлителю опоры подключена система «трос-опоры», которая обеспечивает сопротивление заземления ВЛ «Есиль-Челгаши» - 0,9 Ом (5-я опора вблизи ПС «Есиль»), и ВЛ «Сокол-Заречная» - 2,3 Ома (117 опора, удалённая от ПС). Если это сопротивление повышается на 5 Ом, то напряжение на ЗУ в точке заземления увеличивается незначительно. В случае значительного повышения сопротивления заземления (в опытах на 100 Ом) напряжение на ЗУ становится равным напряжению незаземлённого провода. Этот экспериментальный факт говорит о бесполезности заземления механизмов согласно требований п.5.6.9 ПТБ при эксплуатации электроустановок, расположенных в середине пролёта на штырь, с глубиной погружения 0,5 м. Сопротивление такого штыря, $R_{шт}$ определяется через удельное сопротивление грунта ρ как:

$$R_{шт} = 1,3 \rho.$$

Видим, что в грунтах с удельным сопротивлением 70 Ом·м значение сопротивления заземления достигает 100 Ом, что делает заземление на штырь бесполезным. Если, как предлагалось выше, вокруг автовышки забить штыри по углам прямоугольного контура (например, размером 10×5 м²) и соединить их голыми проводниками, лежащими на земле, то сопротивление такого заземлителя, $R_{конт}$ будет равно:

$$R_{конт} \approx 0,1 \rho.$$

Продолжим рассмотрение экспериментальных данных. На рис.5 представлена осциллограмма наведённого напряжения на ВЛ «Есиль-Челгаши» в процессе заземления линии по концам.

Начало осциллограммы отражает наведённое напряжение незаземлённой ВЛ., содержащее ёмкостную и индуктивную составляющие. При заземлении на ПС «Челгаши» наведенное напряжение с 250 В (здесь и далее - действующие значения) падает до 100-120 В. При этом, поскольку индуктивная составляющая увеличивается, а ёмкостная исчезает, то наведенное напряжение становится более неустойчивым, зависящим от тока во влияющей ВЛ. При заземлении второго, ближнего конца напряжение падает до нескольких вольт. Переход-

ные процессы перед этим отражают, по-видимому, неравномерность включения заземляющих ножей на ПС «Есиль».

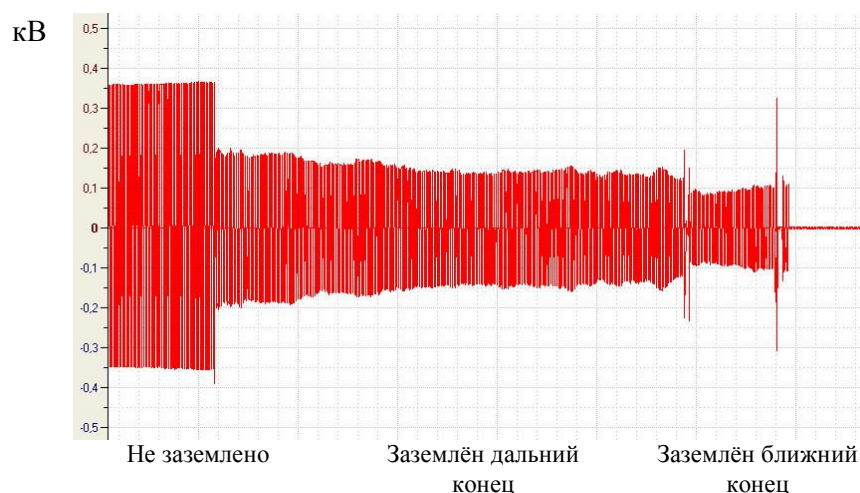


Рис. 5. Осциллограмма наведённого напряжения в процессе заземления ВЛ

Службой инженерной диагностики филиала «Сарбайские МЭС с 2004 по 2007 г.г. было обследовано более 39 ВЛ напряжением от 10 кВ до 1150 кВ. На ВЛ напряжением 110 кВ и выше было измерено наведённое напряжение на проводах 144 опор. При этом влияющими ВЛ были как близко проходящие, так и вторые цепи, расположенные на тех же опорах. Разделение по классу напряжения ВЛ даёт следующую картину:

1150 кВ – 1 ВЛ – 11 опор; 500 кВ – 4 ВЛ – 12 опор;
220 кВ – 18 ВЛ – 63 опоры; 110 кВ – 16 ВЛ – 48 опор.

Поскольку на протяжении четырёхлетних измерений менялась и формировалась методика, приобретался опыт измерений, совершенствовалась аппаратура, то не все данные равнозначны. Объективную картину могут дать статистические показатели этих измерений. В табл.3 приведены средние значения измеренных величин с ошибкой вычисления среднего (по значению среднеквадратичного отклонения).

Таблица 3

Статистические показатели измерений наведённых напряжений и токов

№ п/п	Наименование величины	Объём выборки	Среднее значение величины ± ошибка ср.	Число измерений со значением напряжения выше 42 В
1	Напряжение на проводе при полностью разземлённой ВЛ	16	2120±753 В	16
2	Напряжение на проводе ВЛ, заземлённой по концам, без заземления в точке измерения	38	19,3±2,7 В	6
3	Напряжение на проводе ВЛ, заземлённой по концам, и в точке измерения	158	7,44±1,32 В	10
4	Ток, стекающий в землю при заземлении в точке измерения	43	0,88±0,13 А	-
5	Сопrotивление заземления в точке измерения	19	0,98±0,36 Ом	-

Анализ этой таблицы совместно с полными данными измерений позволяет сделать следующие выводы:

- Наведённые напряжения на разземлённой ВЛ в большинстве случаев превышают 1 кВ. Работы на разземлённой ВЛ, находящейся под наведённым напряжением, следует квалифицировать как работу в электроустановке напряжением выше 1 кВ, выполняемую без снятия напряжения на токоведущих частях или вблизи них.

- При заземлении ВЛ в одной точке (по концам ВЛ разземлена) напряжение приближается к допустимому ГОСТ 12.1.038-82 пределу 20 В. При коротких замыканиях во влияющей сети это напряжение возрастает до десятков киловольт, а напряжение прикосновения к опоре превышает 500 В – предельное допустимое значение при времени воздействия 0,1 с. Работа на ВЛ, разземлённой по концам, и на участках ВЛ со снятыми шлейфами представляет реальную опасность и нарушает требования безопасного проведения работ.

- При заземлении ВЛ по концам и в точке проведения работ напряжение на заземлённом проводе ниже предела 20 В, а напряжение прикосновения к опоре не превышает предела ощущения – 2 В.

Мероприятиями, в наибольшей степени обеспечивающими безопасность будут (в порядке приоритета):

- Снижение сопротивления заземления путем заземления троса на опору с обеих сторон;

- Заземление механизма на опору или на две опоры пролёта путём прокладки заземляющих проводников от механизма к опоре (опорам):

- В необходимых случаях (если предыдущие мероприятия не снизили напряжение прикосновения до 2 В) – прокладка заземляющего контура вокруг механизма, заземляемого по углам на штыри с глубиной погружения 0,5...1,0 м.

О достаточности этих мероприятий говорят также следующие данные: Токи имеют порядок 1 А (при влияющих токах 100...300 А), следовательно, при коротких замыканиях токи, стекающие с опоры не будут превышать 500 А. Среднее сопротивление заземления также составляет 1 Ом. При этом, если на опору заземлён грозозащитный трос, то, как правило, сопротивление заземления составляет доли Ом (начиная от 0,15 Ом). Приведённые цифры показывают, что при заземлении на опору напряжение прикосновения в нормальном режиме не превысит 2 В, а при коротком замыкании во влияющей сети – 200 В. Последнее значение – допустимое напряжение прикосновения при времени воздействия 0,5 с.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. ПОТ Р М – 016 -2001, РД 153-34.0-03.150-00. / министерство труда и социального развития РФ, Министерство энергетики РФ. Утв. 05.01.2001. Введ. 01.07.2001. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2001. – 192 с.

[2] Методические указания по измерению наведённых напряжений на отключённых ВЛ, находящихся вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока. / Министерство топлива и энергетики РФ, Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС. Введ. 1.07.93. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.- 13 с.

[3] Целебровский Ю.В. О нормах безопасности при проведении работ на ВЛ, находящихся под наведённым напряжением. См. настоящий сборник.

[4] Тураев В.А. О наведённых напряжениях на воздушных линиях // Электрические станции, 1995, № 8. С. 48-53.

[5] Иваницкий Ю.М., Целебровский Ю.В. Организационно-технические мероприятия при производстве работ на воздушных линиях электропередачи, находящихся под наведённым напряжением. (Проект внутреннего стандарта АО «КЕГОС» Республики Казахстан для работ на ВЛ под наведённым напряжением). См. настоящий сборник.