

О ПРОБЛЕМЕ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

При выполнении работ на отключенных воздушных линиях электропередачи (ВЛ), находящихся в зоне влияния действующих ВЛ, одной из важнейших проблем является обеспечение условий, при которых наведенное напряжение на рабочем месте не превышает допустимого значения 25 В и позволяет выполнять работы, связанные с прикосновением к токоведущим частям ВЛ, без применения электрозащитных средств.

Часть 1.

М.А. ДРАКО,

*м.т.н., заведующий ЭТЛ ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»*

О.А. МОЙСЕЕНКО,

*заместитель заведующего
ЭТЛ ОУКЭ РУП
«Белэнергосетьпроект»*

А.В. СЕРЕМЯЖКО,

*заведующий ТВН ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»*

Э.И. ЁЧ,

*инженер ТВН ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»*

За весь период исследований в области наведенного напряжения на отключенных линиях электропередачи было издано множество статей, посвященных анализу этой проблемы. В частности, в публикациях российских авторов Ю.В. Целебровского, А.А. Шарандина, А.И. Вантеева и др. [2–4] даются рекомендации и предлагается ряд технических мероприятий, повышающих безопасность выполнения работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением.

В Белорусской энергосистеме принят особый подход к вопросу обеспечения электробезопасности работ под наведенным напряжением. В основе подхода лежит расчетный метод определения величины наведенного напряжения, при этом разработка системы организационных и технических мероприятий для безопасного производства таких работ основывается на расчете потенциальных характеристик проводов отключенных ВЛ, находящихся в зоне влияния действующих. Внедрение разработанных на основе этого метода технических мероприятий вкупе с проведением дальнейших натурных проверочных замеров обеспечивает возможность одновременной работы на ВЛ нескольких бригад, что существенно сокращает затраты времени на ремонтные и эксплуатационные работы.

Факторы, влияющие на уровень наведенного напряжения

Возникновение на проводах отключенной линии напряжения, наводимого проходящей рядом ВЛ, предопределяется двумя основными факторами влияния: электростатическим (зависит только от рабочего напряжения влияющей ВЛ) и электромагнитным (зависит от значения рабочего тока влияющей ВЛ и длины участка параллельного следования ВЛ). Заземление ВЛ в любом месте (включение заземляющих ножей или установка переносного заземления) приводит к снижению статической составляющей напряжения до нуля по всей длине провода [2]. Поэтому выполнение работ без применения электрозащитных средств допускается при условии

заземления провода в непосредственной близости к каждому месту прикосновения [1] – в данном случае емкостное влияние действующей ВЛ будет отсутствовать. При этом необходимо учитывать электромагнитное (индуктивное) влияние, результаты которого наблюдаются как на разземленной, так и на заземленной отключенной ВЛ.

В случае сближения или параллельного следования отключенной и действующей ВЛ на отдельных участках максимальные значения наведенного напряжения будут наблюдаться:

- в точках наибольшего сближения ВЛ, проходящих под углом друг к другу;
- по концам участков совместного прохождения ВЛ;
- при пересечении ВЛ под углом, отличным от 90°;
- в местах транспозиции фаз ВЛ.

Уровень наведенного напряжения на ВЛ или ее отдельных участках во многом зависит от длины участка параллельного следования и режима нагрузок влияющей ВЛ. Кроме того, значения наведенного напряжения на различных фазах и грозотросе будут различаться, поскольку зависят от их геометрии относительно проводов влияющей ВЛ. Наиболее сильное воздействие наблюдается в случае двухцепной ВЛ, когда оставшаяся в работе цепь влияет на отключенную, подвешенную на тех же опорах [3].

Безопасность работ на ВЛ при наведенном напряжении

В нормальном режиме работы значения напряжения на незаземленных проводах ВЛ, находящейся под наведенным напряжением, могут достигать тысяч вольт. В аварийном режиме (при возникновении короткого замыкания на влияющей ВЛ) эта величина может быть на порядок больше, поэтому вопросам обеспечения электробезопасности при проведении ремонтных и эксплуатационных работ на отключенных ВЛ, находящихся под наведенным напряжением, должно уделяться повышенное внимание.

В [4] приводятся следующие варианты обстоятельств прикосновения к незаземленному проводу (тросу) ВЛ при нормальном режиме работы:

- при наложении и снятии переносного заземления с нарушением установленного порядка (отсоединение от земли при сохранении контакта с проводом, что вероятно при снятии двух параллельных переносных заземлений или при слабом закреплении контакта с землей);
- при присоединении переносного заземления к закладным деталям и металлическим траверсам железобетонной опоры, которые могут оказаться незаземленными из-за отсутствия связи с арматурным каркасом опоры либо из-за сильной коррозии в узле закладной детали;
- при присоединении переносного заземления к незаземленным или плохо заземленным частям подъемного механизма (телескопической вышки);
- при снятии (разрезке) шлейфов на анкерных опорах;
- при любых работах на незаземленном конце провода или грозотроса.

Следует отметить, что в Республике Беларусь с вводом в действие [1] нормируемое значение наведенного напряжения снизилось с 42 В до 25 В. Ужесточение данного критерия, в свою очередь, повлекло за собой необходимость пересмотра перечня линий, при отключении и заземлении которых по концам (в распределительных устройствах подстанций и станций) значение наведенного напряжения на заземленных проводах, пересчитанное к наибольшему длительно допустимому току влияющей ВЛ, превышает допустимое значение.

В случае, когда наибольшее значение наведенного напряжения по всей длине ВЛ не превышает 25 В, линия относится к категории безопасного действия наведенного напряжения, в связи с чем работы могут проводиться с использованием обычных средств защиты. Линии, по всей длине которых либо на отдельных участках этот показатель превышает установленную норму, относятся к категории линий с опасным действием наведенного напряжения. Согласно [1] на таких ВЛ работы должны производиться после специальных защитных технических мероприятий (установки заземлений, разземления концов ВЛ и заземления на базовый заземлитель, разрезания проводов и др.) по технологическим картам или проектам производства работ (указаниям), которые разрабатываются индивидуально для каждой ВЛ с учетом всех влияющих факторов.

Классификация ВЛ по степени опасности наведенного напряжения

Стандарт [1] относит к линиям, находящимся под наведенным напряжением, ВЛ, воздушные линии связи (ВЛС) и контактные сети электрифицированной железной дороги, которые по всей длине или на отдельных участках общей длиной не менее 2 км проходят на расстоянии 100–250 м от оси другой ВЛ напряжением 110–750 кВ.

Согласно [1] структурные подразделения предприятий, обслуживающие ВЛ, должны иметь перечень линий, которые после отключения находятся под наведенным напряжением. Работники указанных подразделений должны быть ознакомлены с перечнем и величинами наводимого напряжения. При проведении на ВЛ работ по наряду делается запись о наличии наведенного напряжения в строке наряда «Отдельные указания».

Функция распределения наведенного напряжения на проводах и тросах по всей длине ВЛ не является линейной. Учитывая этот факт, определить диапазон возможных максимальных значений величины наведенного напряжения путем измерений не представляется возможным. Наиболее приемлемым выходом из данной ситуации является оценка уровня наведенного напряжения с применением математического аппарата.

Для разработки конкретных защитных мероприятий расчетным путем производится классификация участка или всей ВЛ по степени опасности наведенного напряжения. Окончательной целью расчета является выявление оптимальной по условиям электробезопасности схемы заземления отключенной ВЛ, находящейся под наведенным напряжением, причем для влияющих ВЛ принимается нормальный режим работы с наибольшей длительно допустимой по условию нагрева нагрузкой.

В алгоритме программного расчета влияния заданной ВЛ на отключенную выделяют две группы цепей: фазы влияющей ВЛ; провода и тросы отключенной ВЛ, а в случае подвески на общих опорах – все провода и тросы этих ВЛ. Расчет напряжений и токов в такой системе цепей сводится к интегрированию систем дифференциальных уравнений [5, 6].

Изложенный подход базируется на том, что линейная система дифференциальных уравнений в общем случае не может быть применена для расчета наведенного напряжения по всей длине ВЛ в силу того, что его значения не являются однородными на всем протяжении ВЛ. Поэтому для расчета линии разбиваются на однородные участки, и общее решение задачи, получаемое путем сложных математических преобразований, выражается через частные решения для таких участков. Для этого на каждом участке провода и тросы условно заменяются подвешенными над землей бесконечно длинными проводниками. Их диаметры, расстояния между ними и высота подвеса принимаются равными соответствующим параметрам, используемым при расчетах.

Специалистами РУП «Белэнергосетьпроект» разработан принципиально новый подход к расчету уровней наведенного напряжения, который основывается на решении системы нелинейных уравнений, где каждая ВЛ представлена полноценной системой проводников с распределенными параметрами и полным учетом взаимного влияния между всеми проводами данной системы.

Выбор схемы заземления

Разработка мероприятий по защите от наведенного напряжения основывается на оценке условий электробезопасности на ВЛ под наведенным напряжением при определенной схеме заземления ВЛ, линейного оборудования, рабочих участков и рабочих мест. При этом критерием эффективности защитных мероприятий является снижение наведенного напряжения на заземленном рабочем месте до уровня, не превышающего безопасной величины 25 В.

В ГПО «Белэнерго» могут выполняться следующие типы заземления ВЛ, линейного оборудования, рабочего участка и рабочих мест:

- подстанционное (ПЗ) – выполняется присоединением фаз ВЛ к заземляющему устройству подстанции путем включения заземляющих ножей линейного разъединителя в сторону ВЛ. Служит для заземления концов ВЛ;

- дополнительное (ДЗ) – выполняется присоединением проводов фаз ВЛ в распределительном устройстве подстанции к заземленным металлическим элементам оборудования с помощью переносного заземления. Служит дополнительным защитным заземлением при работах на линейном разъединителе подстанции. Установка и снятие ДЗ осуществляется только при включенном ПЗ;
- линейное (ЛЗ) – выполняется присоединением проводов фаз, грозозащитного троса, на которых производятся работы, к заземляющему устройству опоры с помощью переносного заземления. Служит для заземления рабочего места;
- базовое (БЗ) – выполняется присоединением проводов всех фаз ВЛ к заземляющему устройству опоры с помощью двух параллельных переносных заземлений для каждой фазы. Служит для заземления ВЛ при разземлении ее начала и конца;
- специальное (СЗ) – выполняется присоединением всех фаз ВЛ с помощью переносного заземления к заземляющему устройству опоры, место которой, а также значение сопротивления заземлителя определяются расчетным путем конкретно для каждой ВЛ. Служит для снижения до безопасной величины уровня наведенного напряжения на заземленной в начале и в конце ВЛ или ее отдельных участках.

Переносное заземление, с помощью которого выполняется ЛЗ, ДЗ или СЗ, должно иметь сечение не менее 25 мм². ПЗ на металлических опорах присоединяется к элементам опоры, на железобетонных – к заземляющему устройству опоры. В качестве СЗ используются система «трос – опоры ВЛ», локальные заземлители, устанавливаемые в зоне расположения опоры, заземляющие устройства соседних линий, а также комбинации системы «трос – опоры ВЛ» и локальных заземлителей.

Для снижения уровня наведенного напряжения на рабочем месте до допустимой величины на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением, на основании программного расчета применяются схемы заземления, представленные на рисунке 1 (а–д).

Распределение наведенного напряжения на проводах отключенной ВЛ, на всем протяжении проходящей в зоне влияния действующей ВЛ, при выполнении рассмотренных схем заземления представлено на рисунке 2.

Получив расчетным путем распределение наведенного напряжения по длине ВЛ, можно классифицировать линии по степени опасности наведенного напряжения, а также разработать практические рекомендации и защитные мероприятия по безопасному проведению работ на таких ВЛ.

Схема заземления № 1 (рис. 1, а) устанавливает участки, безопасные при проведении работ на ВЛ и на линейном оборудовании подстанций. При обеспечении безопасности работ под наведенным напряжением данная схема имеет преимущество перед другими. Когда наведенное напряжение на ВЛ не превышает 25 В, режим заземления линии с обоих концов является единственно целесообразным. При наличии ответвлений от ВЛ для схемы № 1 возможны вариации с разземлением или заземлением всех или части ответвлений на подстанциях, что определяется расчетом.

В случаях, когда схема № 1 не может обеспечить безопасного проведения работ на отдельных участках ВЛ, применяются схемы № 2 (рис. 1, б) и № 3 (рис. 1, в). Их существенным недостатком является то, что они исключают возможность выполнения работ на линейном оборудовании разземленного конца ВЛ, поскольку наведенное напряжение там будет

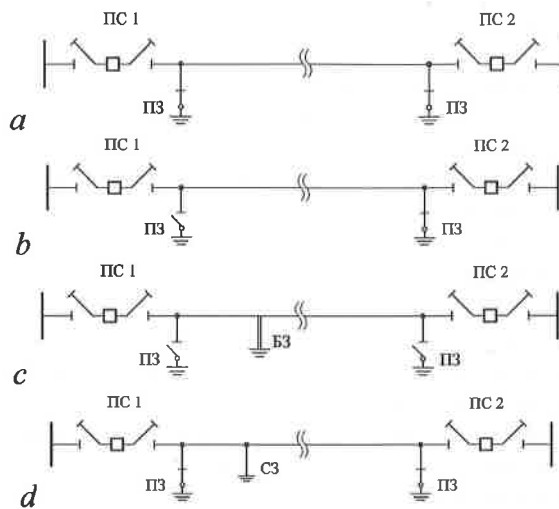


Рис. 1. Применяемые схемы заземления ВЛ:

- а) схема № 1 – ВЛ заземлена в начале и в конце на ПЗ;
- б) схема № 2 – ВЛ на одном конце разземлена, на другом заземлена на ПЗ;
- в) схема № 3 – ВЛ по концам разземлена и заземлена на БЗ;
- д) схема № 4 – ВЛ заземлена в начале и в конце на ПЗ и в одном или нескольких местах – на СЗ

принимать наибольшее значение. Помимо этого, при использовании схемы № 3 может возникнуть проблема заземления ВЛ на БЗ при переходе от одного рабочего места к другому, а выход из строя БЗ переводит ВЛ в режим разземленной.

В тех случаях, когда режим заземления ВЛ с обоих концов не обеспечивает необходимый уровень электробезопасности, на отдельных рабочих участках следует дополнительно заземлить ВЛ на СЗ (рис. 1, д), что обеспечит снижение значения наведенного напряжения до безопасного и позволит устранить недостатки схем № 2 и № 3, а также существенно расширить применение схемы № 1.

Практический смысл схемы № 4, разработанной в РУП «Белэнергопроект» в 1995 году [6], заключается в установке на ВЛ стационарного специального низкоомного заземления в определенных (расчетных) местах, что позволяет снижать уровень наведенного напряжения до безопасных величин по всей длине или на отдельных участках ВЛ.

Требования к выполнению заземления ВЛ

Особые трудности возникают при выполнении специального заземления в высокоомных грунтах, так как нормируемое сопротивление заземления опор находится в прямой зависимости от удельного электрического сопротивления земли. Величина сопротивления СЗ определяется при расчете наведенного напряжения по критерию обеспечения электробезопасности при работах на проводах ВЛ, а нормируемое сопротивление заземления опор выбирается по критерию обеспечения грозупорности изоляции ВЛ [7]. Поэтому величина сопротивления специального заземлителя может быть значительно меньше величины сопротивления заземления опор, нормируемого [1], и составлять менее 1 Ом.

В районах с большим удельным сопротивлением земли в качестве первоочередного мероприятия по достижению нормированного сопротивления растеканию стандарт [8] рекомендует установку вертикальных глубинных заземлителей увеличенной длины, в частности составных вертикальных за-

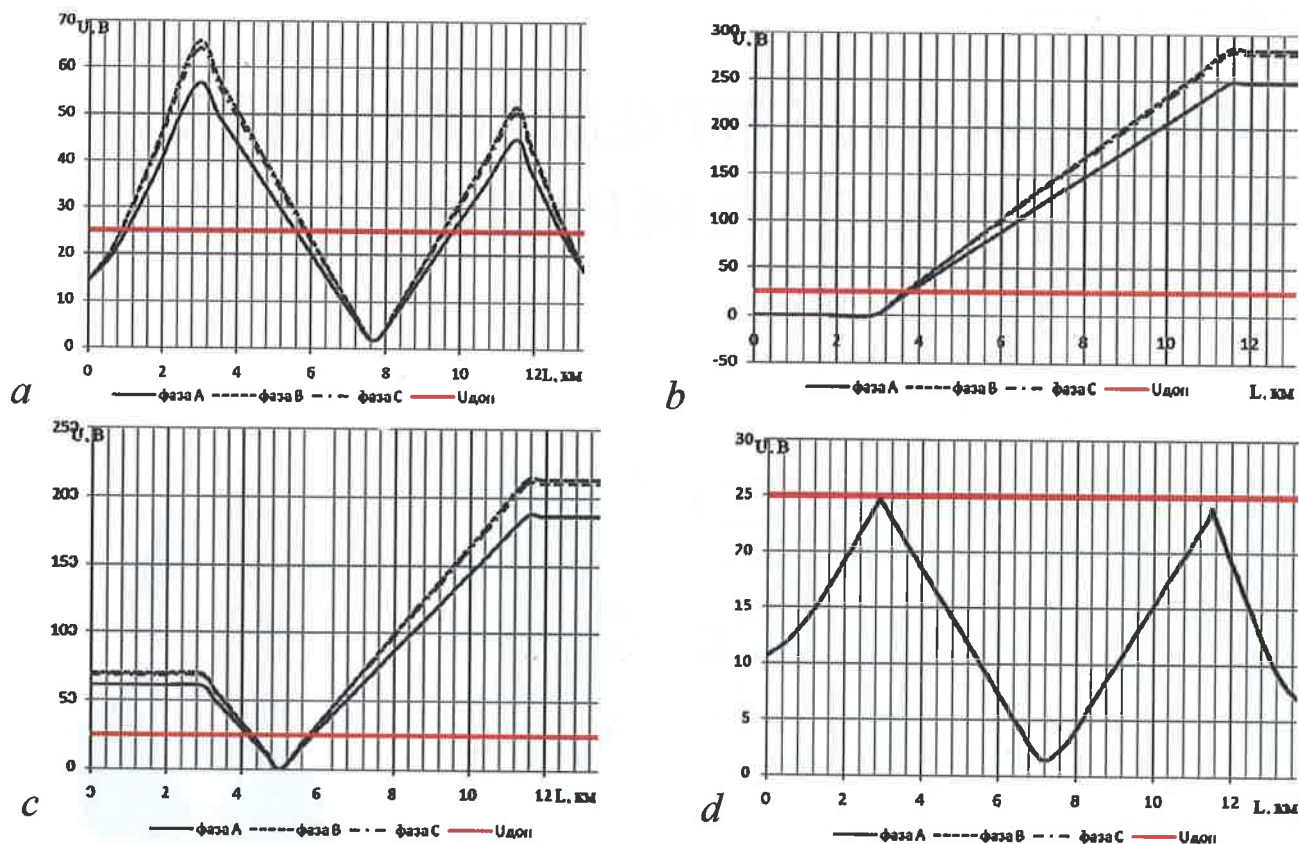


Рис. 2. Распределение наведенного напряжения по отключенной и заземленной ВЛ (U – расчетное значение наведенного напряжения, $U_{доп}$ – допустимое значение наведенного напряжения): а – схема № 1; б – схема № 2; в – схема № 3; д – схема № 4

землителей длиной до 30 м – при снижении удельного сопротивления с глубиной.

Следует отметить, что снижение удельного сопротивления земли с глубиной характерно почти для всей территории Республики Беларусь. В связи с этим в местах предполагаемого монтажа СЗ рекомендуется проводить геофизические исследования электрической структуры грунта методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), который является наиболее достоверным.

Технические мероприятия по подготовке рабочих мест и допуску к работам под наведенным напряжением предусматривают режимы заземления ВЛ, линейного оборудования, рабочих участков и рабочих мест, устанавливаемые в соответствии с разработанными схемами заземления ВЛ [9].

Во второй части статьи будет описана математическая модель и рассмотрен опыт, накопленный РУП «Белэнергосеть-проект» при выполнении измерений наведенного напряжения на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 110 кВ и выше.

Выводы

1. Для определения наведенного напряжения от двух и более влияющих линий необходимо применение математического аппарата, учитывающего долю каждой влияющей линии в формировании значения наведенного напряжения, а также топологию сети.

2. Задача обеспечения электробезопасности при проведении ремонтных и эксплуатационных работ на ВЛ 35–750 кВ, находящихся под наведенным напряжением, должна решаться как аналитически (математическим моделированием), так и проведением серии экспериментальных измерений.

Список литературы

1. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок: ТКП 427-2012: утв. М-вом энергетики РБ 28.11.12. – Введ. 2013-03-01. – Минск: Минэнерго, 2013. – 148 с.; ил.
2. Шарандин, А.А. Наведенное напряжение и защита от него / А.А. Шарандин. – М.: Энергопрогресс; Энергетик, 2016. – 40 с.
3. Вантеев, А.И. Вопросы безопасной организации работ на воздушных линиях электропередачи / А.И. Вантеев. – М.: Энергопрогресс; Энергетик, 2014. – 84 с.; ил. – Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; вып. 4 (184).
4. Целебровский, Ю.В. Безопасность работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением. Реальные опасности и методики измерения напряжений / Ю.В. Целебровский // Новости электротехники. – 2009. – № 1 (55). – С. 54–57.
5. Михайлов, М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Связь, 1979. – 264 с.; ил.
6. Расчет наведенного напряжения на линиях электропередачи и обеспечение безопасности работ на этих линиях / В.И. Глушко [и др.] // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 13–18.
7. Драко, М.А. О необходимости вертикального электрического зондирования в местах установки опор ВЛ 35–750 кВ / М.А. Драко, А.М. Короткевич, Э.П. Ковалев // Энергетическая стратегия. – 2015. – № 1. – С. 25–27.
8. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросилового и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2011. – Введ. 23.08.11. – Минск: Минэнерго, 2011. – 601 с.
9. Бохан, Н.В. Безопасное производство работ на ВЛ под наведенным напряжением / Н.В. Бохан, В.И. Глушко, Э.П. Ковалев, О.Е. Ямный // Техника без опасности. – 2007. – № 3. – С. 31–32.