

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.З. ГИЛЯЗОВ, В.С. ЛАРИН, Д.А. МАТВЕЕВ

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
«ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН»**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по курсу
«Изоляция и перенапряжения»
для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика»

УДК
621.311
Г 479

Утверждено учебным управлением МЭИ (ТУ)

*Подготовлено на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений
Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.К. Лоханин*

Гилязов М.З.

Г 479 Компьютерная лабораторная работа «Защита подстанций от набегающих волн»: метод. пособие / М.З. Гилязов, В.С. Ларин, Д.А. Матвеев. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 32 с.

Представлено описание компьютерной лабораторной работы, посвященной изучению методов ограничения перенапряжений на электрооборудовании подстанций вследствие набегания волн грозового происхождения. Рассматривается влияние на уровень перенапряжений параметров набегающей волны, компоновки электрооборудования на подстанции и типа защитных аппаратов. Изложены методы оценки допустимых напряжений внешней и внутренней изоляции электрооборудования, а также подход к расчету надежности защиты подстанции от набегающих волн.

Для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей, изучающих дисциплину «Изоляция и перенапряжения».

© Московский энергетический институт
(технический университет), 2010

Компьютерная лабораторная работа ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Причиной возникновения на подстанции опасных перенапряжений от набегающих волн являются грозовые поражения воздушных линий (ВЛ) электропередачи. При ударе молнии в линию на проводах ВЛ образуется волна напряжения, движущаяся в сторону подстанции. Амплитуда такой волны ограничена импульсной прочностью линейной изоляции (см. Приложение 1).

Приход волны напряжения на подстанцию приводит к возникновению волнового переходного процесса, в результате которого на изоляции электрооборудования могут возникнуть опасные перенапряжения. Поэтому для защиты изоляции оборудования применяются ОПН (ограничители перенапряжений нелинейные), пришедшие на смену вентильным разрядникам (РВ) (см. Приложение 2). Серийный выпуск РВ прекращен в России с 1997 года, но в эксплуатации находится еще много таких устройств.

Если бы ОПН или РВ располагались в непосредственной близости от защищаемого ими электрооборудования, то напряжение на его изоляции не превышало бы остающегося напряжения защитного аппарата, и защита была бы достаточно надежной. На практике защитные аппараты устанавливаются у силовых трансформаторов и автотрансформаторов и, возможно, еще в нескольких местах. Поэтому часть оборудования удалена от защитных аппаратов на расстояния, которые могут достигать нескольких десятков метров и более. Приход волны грозового происхождения с крутым фронтом приводит к возникновению переходного процесса, сопровождающегося высокочастотными колебаниями вокруг остающегося напряжения ОПН или РВ. Амплитуда перенапряжений на оборудовании при этом тем больше, чем больше крутизна набегающей волны и его удаленность от защитного аппарата.

Для понимания механизма формирования перенапряжений, действующих на изоляцию электрооборудования, можно рассмотреть две упрощенные схемы замещения подстанции. Первая схема (рис. 1,а) составлена для оборудования, расположенного до защитного аппарата по ходу движения волны, это в первую очередь относится к измерительным трансформаторам напряжения и тока. Вторая схема (рис. 1,б) является типичной для защиты от перенапряжений силового трансформатора.

На обеих схемах показаны линия электропередачи с волновым сопротивлением $Z_{л}$, участки ошиновки суммарной длиной l и ОПН. Набегающая волна $u_{пад}$ представлена стилизованным косоугольным импульсом с длительностью фронта $\tau_{ф}$ и амплитудой $U_{max} = U_{50\%}$. Пунктиром обозначено эквивалентное волновое сопротивление отходящих линий $Z_{эКВ} = Z_{л}/n$, где

n – число линий. Электрооборудование подстанции (трансформаторы, выключатели, разъединители) для расчета волновых процессов замещают емкостями (замещение трансформатора емкостью справедливо только для первых микросекунд переходного процесса, пока индуктивности препятствуют прохождению через них импульсных токов).

На рис. 2 приведены идеализированные осциллограммы напряжений в точках 1 и 2 схемы рис. 1а. Они построены в предположении, что емкость электрооборудования $C = 0$, а ОПН имеет идеальную вольт-амперную характеристику – при напряжениях меньше $U_{ост}$ его сопротивление равно бесконечности, а при превышении уровня $U_{ост}$ становится равным нулю его динамическое сопротивление (напряжение на ОПН при этом неизменно и равно $U_{ост}$). В момент времени $t = 0$ набегающая с линии волна приходит в точку 1 и на оборудовании напряжение $u_{и}$ начинает линейно возрастать (рис. 2,а). Через время $\tau = l/v$ (v можно принять равной скорости света) волна придет в точку 2. До тех пор, пока ОПН находится в непроводящем состоянии, отраженная от него волна будет равна падающей, а напряжение на нем будет нарастать с удвоенной скоростью. Когда оно достигнет уровня $U_{ост}$ напряжение на ОПН стабилизируется, а отраженная волна начнет уменьшаться, меняя знак на обратный:

$$u_{отр} = U_{ост} - u_{пад} = U_{ост} - U't,$$

где $U' = U_{50\%}/\tau_{\phi}$ – крутизна фронта набегающей волны.

Отраженная волна вернется в точку 1 в момент времени $t = 2\tau$, накладываясь на напряжение набегающей волны (рис. 2,а). Результирующее напряжение на изоляции электрооборудования оказывается неизменным и равным:

$$\begin{aligned} u_{и} &= u_{пад}(t) + u_{отр}(t - 2\tau) = U't + U_{ост} - U'(t - 2\tau) = \\ &= U_{ост} + U'2\tau = U_{ост} + U'2\frac{l}{v}. \end{aligned}$$

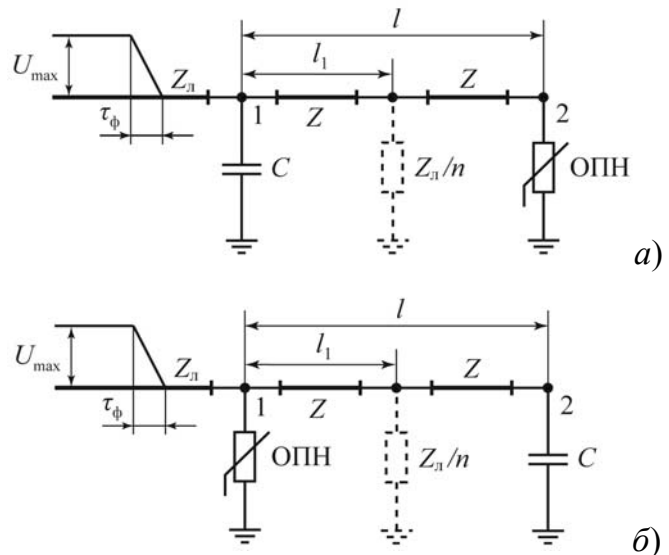


Рис. 1. Упрощенные схемы замещения подстанции

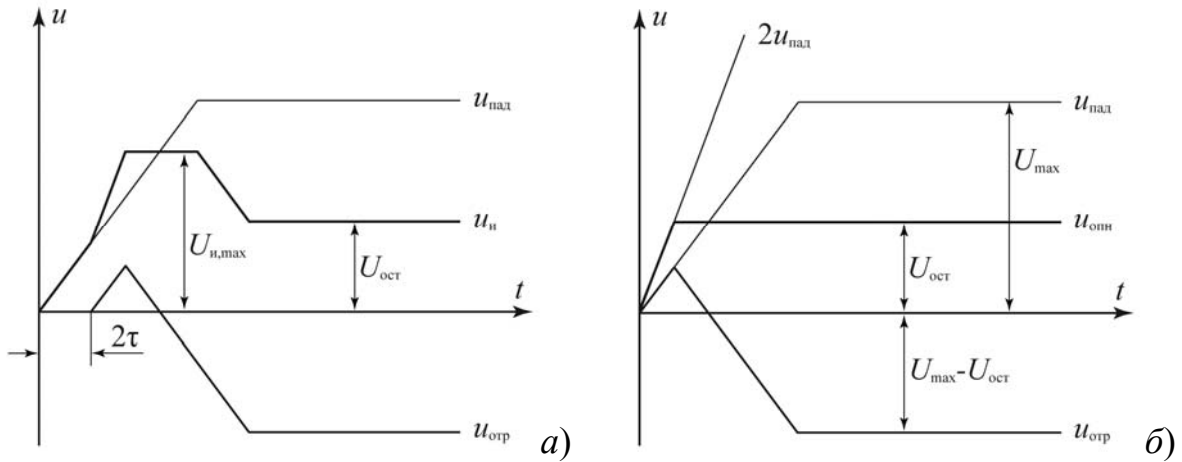


Рис. 2. Формирование напряжений в схеме рис. 1,а при $C = 0$
 а – в точке 1; б – в точке 2

Эта формула справедлива при $\tau_{\phi} > 2\tau$ и позволяет сделать оценку максимального напряжения $U_{и,маx}$ на изоляции электрооборудования в точке 1. За пределами фронта набегающей волны напряжение на оборудовании снижается до остающегося значения $U_{ост}$.

При учете емкости электрооборудования и действительной вольтамперной характеристики ОПН напряжения оказываются такими, как показано на рис. 3,а. Преломление волны в точке 1 при учете емкости происходит со сглаживанием фронта. Отраженная от ОПН волна также сглаживается емкостью, и результирующее напряжение на изоляции оборудования изменяется более плавно, чем при отсутствии емкости.

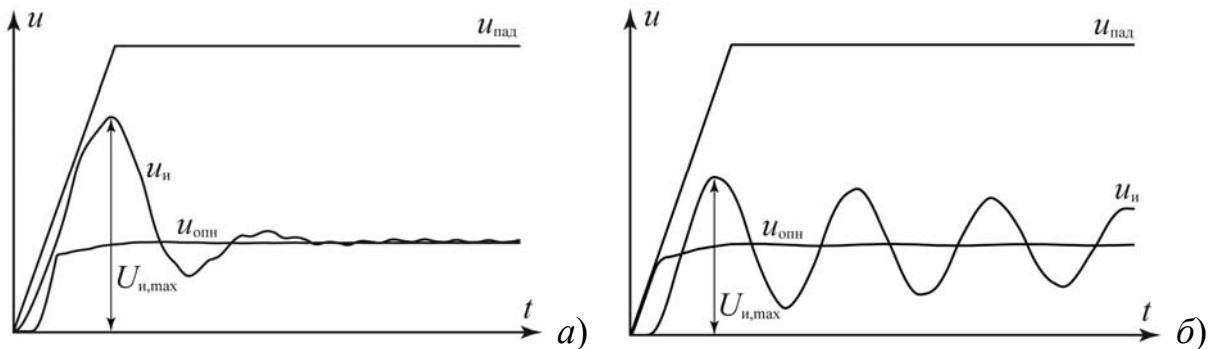


Рис. 3. Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании
 а – для схемы рис. 1,а; б – для схемы рис. 1,б

Отходящие от подстанции линии снижают уровень перенапряжений. Если отходящая линия удалена от электрооборудования на расстояние l_1 (рис. 1,а), то в этой точке на схеме замещения следует включить ее волновое сопротивление $Z_{л}$. Пройдя расстояние l_1 , набегающая волна отражается

от точки включения отходящей линии. Коэффициент отражения при этом отрицательный, а его значение зависит от числа отходящих линий. К оборудованию возвращается отраженная волна, и ее напряжение, накладываясь на напряжение набегающей волны, снижает перенапряжение (так как напряжение отраженной волны отрицательно). Чем дальше от точки 1 расположена отходящая линия, тем позже приходит отраженная от нее волна и тем меньшим оказывается ее влияние.

Проанализируем перенапряжения в точках подстанции, расположенных за ОПН по ходу распространения волны (схема рис. 1,б). Будем считать, что когда набегающая волна достигает на ОПН уровня $U_{ост}$, он переходит в проводящее состояние и напряжение на нем перестает изменяться. Поэтому после преломления набегающей волны в точке 1 к емкости электрооборудования распространяется волна с амплитудой $U_{ост}$. Если пренебречь емкостью оборудования ($C = 0$), то волна будет отражаться от точки 2 с коэффициентом отражения $\beta = 1$. Возвращаясь в точку 1, волна отражается с $\beta = -1$ (так как пренебрегаем сопротивлением ОПН). Процесс последовательных отражений волны от точек 1 и 2 будет периодическим, в результате напряжение в точке 2 будет колебаться вокруг значения $U_{ост}$, амплитуда колебаний составит $2U_{ост}$. Если учесть емкость оборудования и вольт-амперную характеристику ограничителя, то напряжение на оборудовании примет форму униполярного колебательного импульса (рис. 3,б).

Подведем итог изучению грозových перенапряжений в упрощенных схемах (сделанные выводы оказываются также справедливыми для большинства типовых схем). Имеют место следующие закономерности:

- амплитуда импульса грозového перенапряжения на электрооборудовании тем больше, чем дальше расположен защитный аппарат и чем больше крутизна фронта набегающей волны;

- форма импульса грозového перенапряжения на электрооборудовании, расположенном до ОПН, характеризуется коротким пиком, после которого напряжение снижается до значения, близкого к остающемуся напряжению ограничителя (рис 3,а);

- форма импульса грозového перенапряжения на электрооборудовании, расположенном за ОПН, имеет характер затухающих колебаний, накладывающихся на остающееся напряжения ограничителя (рис. 3,б), т.е. униполярного колебательного импульса с периодом колебаний порядка нескольких микросекунд; огибающая максимумов этих колебаний, как правило, спадает быстрее, чем стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс.

Уровень перенапряжений зависит от параметров ОПН и уменьшается в случае применения ОПН с меньшими остающимися напряжениями.

Расчет грозových перенапряжений в реальных схемах подстанций осуществляется с помощью численного моделирования. Для исследования на расчетной модели нужно составить схему замещения подстанции, исполь-

зую план подстанции с обозначением расстояний по ошиновке и соединительным проводам. Электрооборудование следует заменить сосредоточенными емкостями. Значения этих емкостей для основных видов электрооборудования класса напряжения 110 кВ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Входные емкости электрооборудования ПС 110 кВ

Наименование оборудования	Значения входных емкостей, пФ
Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	1500
Электромагнитные трансформаторы напряжения	300
Трансформаторы тока	150
Выключатели масляные (вкл./выкл.)	800/500
Разъединители (вкл./выкл.)	60/40

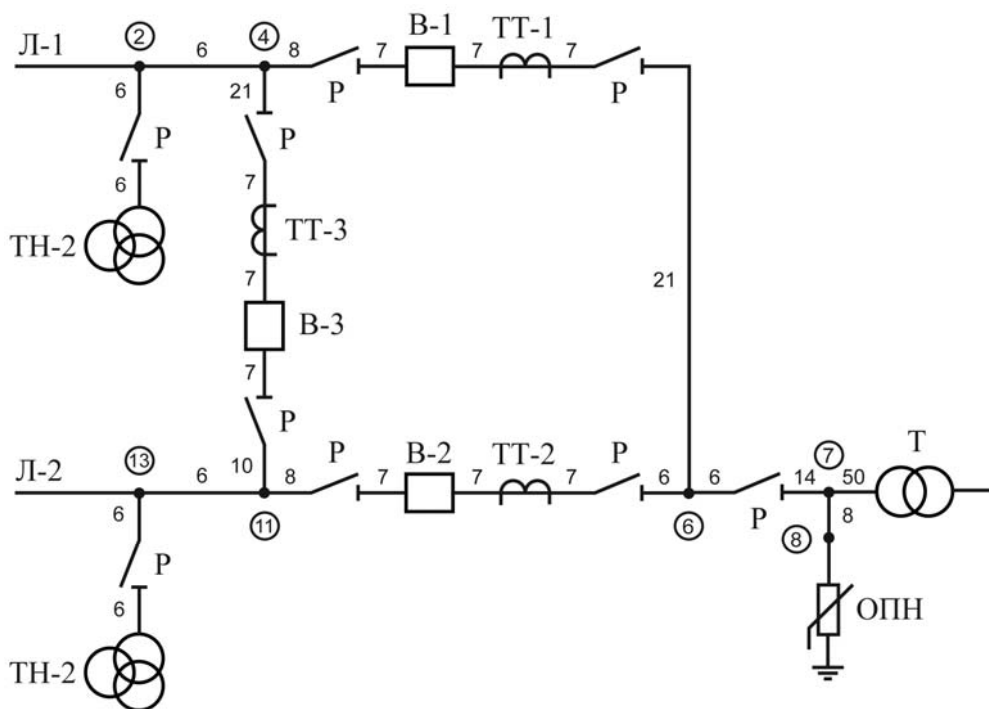


Рис. 4. Схема ОРУ 110 кВ

Л-1, Л-2 – подходящие воздушные линии электропередачи; ТН-1, ТН-2 – трансформаторы напряжения; ТТ-1, ТТ-2, ТТ-3 – трансформаторы тока; Т – силовой трансформатор; В-1, В-2, В-3 – масляные выключатели; Р – разъединители

На рис. 4 представлена схема ОРУ 110 кВ (треугольник), а на рис. 5,а – расчетная схема замещения. Цифры в схеме на рис. 4, а также подчеркнутые цифры на рис. 5,а указывают расстояния в метрах между аппаратами или узловыми точками, цифры у емкостей – значения емкостей

в пикофарадах. Полученная схема может быть исследована непосредственно на расчетной модели, но ее можно упростить для экономии расчетного времени.

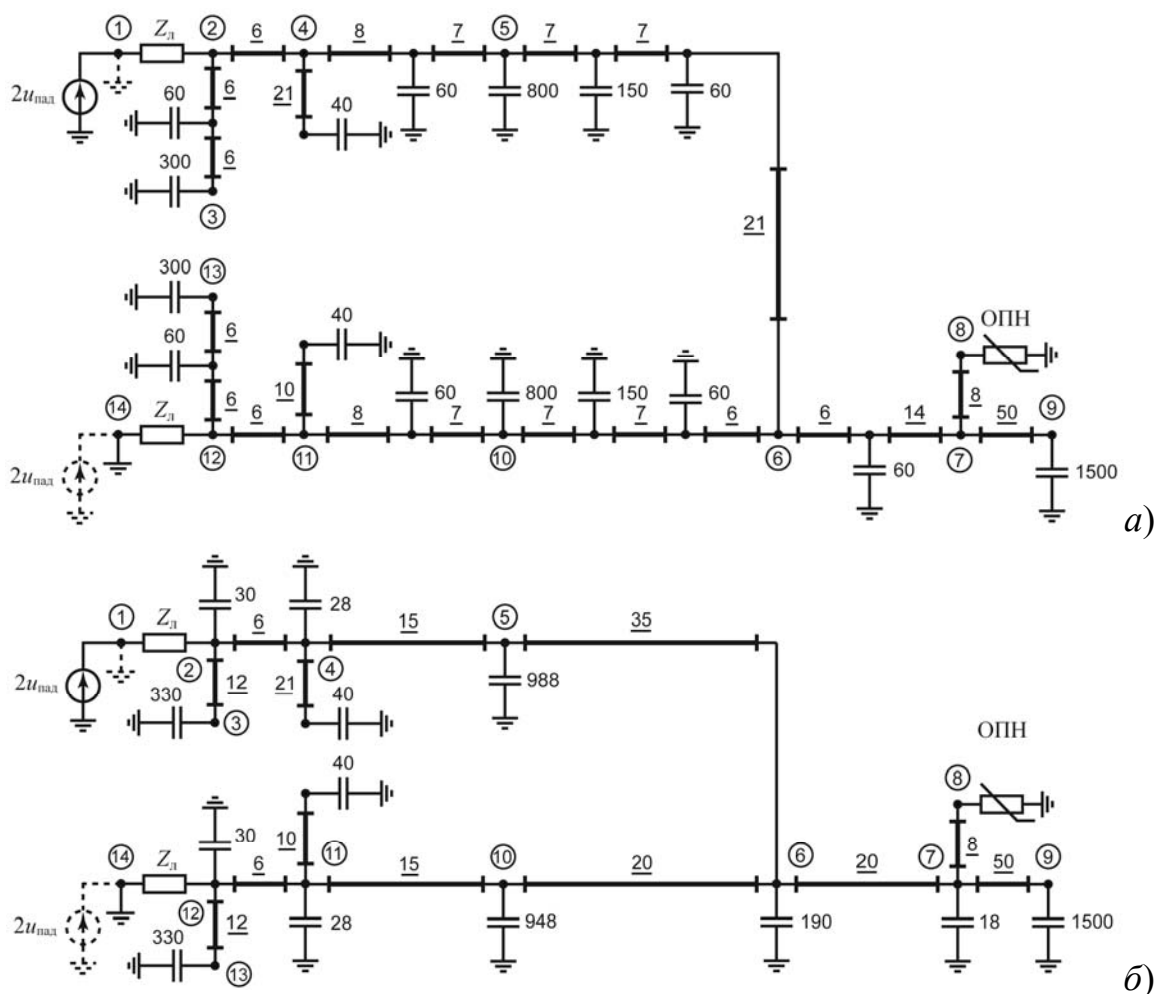


Рис. 5. Схема замещения ОРУ 110 кВ, изображенного на рис. 4, при отключенном выключателе В-3
а – полная; б – упрощенная

Наибольший интерес представляет определение напряжений в точках, наиболее удаленных от защитных аппаратов, – на трансформаторе напряжения, линейном разъединителе и силовом трансформаторе. Поэтому перед преобразованием схемы необходимо наметить точки (узлы), которые должны быть сохранены (именно эти узлы пронумерованы на схеме рис. 5,а). Затем можно упростить схему, разнеся часть емкостей в наметенные узлы по правилу моментов (см. Приложение 4). Упрощенная схема представлена на рис. 5,б.

Для оценки надежности защиты подстанционного электрооборудования от набегающих волн необходимо сопоставить расчетные импульсные напряжения, которые могут возникать на изоляции, с ее электрической

прочностью. Расчетные напряжения следует определять с учетом ряда случайных факторов – фазы рабочего напряжения в момент прихода набегающей волны и ее формы (амплитуды, длительности фронта и импульса, частоты наложенных колебаний). Форма набегающей волны, в свою очередь, зависит от места грозового поражения ВЛ и параметров тока молнии, также являющихся случайными. Таким образом, строгое определение расчетных напряжений – задача, которая принципиально должна решаться с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

Сопоставление расчетных напряжений с электрической прочностью изоляции электрооборудования можно выполнить следующим образом. Для каждого вида оборудования в ГОСТ 1516.3 регламентированы испытания грозowymi импульсами и нормированы значения *испытательных* напряжений. Для учета отличий между условиями при испытаниях и в эксплуатации вводят понятие *допустимого* напряжения, которое определяют по-разному для внутренней и внешней изоляции оборудования.

При определении допустимых напряжений необходимо учитывать отличие формы расчетного и испытательного импульсов напряжения. Для внешней изоляции следует также учитывать отличие атмосферных условий (давления, температуры, влажности) от тех, к которым приведены испытательные напряжения.

Указанные обстоятельства в той или иной мере были учтены на этапе определения регламентированных Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) расстояний между электрооборудованием и защитными устройствами (РВ или ОПН). Важно понимать, что требования ПУЭ определены для ряда типовых схем, если же схема или компоновка распределительного устройства отличается от типовой, то необходимо выполнять специальные расчеты защиты подстанции от набегающих волн.

Для оценочных расчетов надежности защиты подстанции от набегающих волн допустимое напряжение для внутренней изоляции трансформаторов может рассчитано по формуле:

$$U_{\text{доп}} = 1,1(U_{\text{ПГИ}} - 0,5U_{\text{ном}}),$$

где $U_{\text{ПГИ}}$ – испытательное напряжение полным грозовым импульсом; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

Эта формула учитывает отличие формы импульса воздействующего напряжения от стандартной формы, а также влияние рабочего напряжения. При использовании этой формулы расчет грозовых перенапряжений следует проводить без учета напряжения промышленной частоты. Полученная оценка допустимого напряжения будет иметь запас, избыточность которого особенно критична для электрооборудования СВН и УВН.

Допустимое напряжение для внешней изоляции (вводов, разъединителей, выключателей и др.) определяется вольт-секундной характеристикой

(ВСХ) для стандартного испытательного импульса 1,2/50 мкс. Если ВСХ неизвестна, то ее можно приближенно оценить через испытательные напряжения полным и срезанным грозowymi импульсами с помощью следующей формулы:

$$U_{\text{доп}}(t) = B_0 \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}}. \quad (1)$$

Коэффициенты B_0 и T_0 определяются подстановкой в эту формулу испытательного напряжения срезанным грозowym импульсом при времени 2 мкс и полным грозowym импульсом при времени 8 мкс, и решением получившейся системы уравнений.

Нормированные в ГОСТ 1516.3 испытательные напряжения внешней изоляции в сухом состоянии получены делением амплитуды расчетных перенапряжений на коэффициент 0,84, т.е. испытательные напряжения выше расчетных воздействий на 19 %. Это повышение учитывает возможность снижения разрядного (и выдерживаемого) напряжения внешней изоляции в эксплуатационных условиях на высоте 1000 м над уровнем моря (при отклонениях давления, температуры и влажности воздуха) относительно разрядного напряжения, соответствующего нормальным атмосферным условиям.

Для приближенного определения допустимых напряжений внешней изоляции в формулу (1) следует подставлять значения испытательных напряжений полного и срезанного грозowych импульсов, умноженные на коэффициент 0,84. При корректировке допустимых напряжений с учетом определенных атмосферных условий можно воспользоваться расчетными соотношениями, приведенными в разделе 4.5 ГОСТ 1516.2.

Испытательные напряжения полным и срезанным грозowymi импульсами для силовых трансформаторов и автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и трансформаторов напряжения приведены в Приложении 5.

Основным показателем надежности защиты от набегающих волн является среднее число лет безаварийной работы подстанционного электрооборудования M . При проектировании защиты от грозowych перенапряжений экономически целесообразным оказывается не исключать полностью возможность появления перенапряжений, превышающих допустимые значения, а ограничиться малой вероятностью повреждения изоляции оборудования. Рекомендуемые показатели надежности грозозащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) в зависимости от класса номинального напряжения подстанции приведены в табл. 2.

Как было установлено при анализе простых схем, перенапряжения на электрооборудовании тем больше, чем круче фронт набегающей волны. Существует *критическая крутизна фронта*, превышение которой может вызывать перенапряжения, превышающие допустимые напряжения для

изоляции. Оценив значение критической крутизны, можно рассчитать среднее число лет безаварийной работы подстанции.

Таблица 2

Рекомендуемые показатели надежности защиты подстанции

$U_{\text{ном}}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
M , годы	200-300	300-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1500

Расчетное определение критической крутизны можно выполнить с помощью компьютерного моделирования. Для электрооборудования наиболее удаленного от ОПН или РВ (например, в точках 3 и 9 на рис. 5) выполняется серия расчетов перенапряжений при последовательном увеличении крутизны фронта импульсного источника.

Для внутренней изоляции электрооборудования критическая крутизна определяется из условия равенства максимума напряжения на изоляции и допустимого напряжения (рис. 6). Для внешней изоляции электрооборудования условием перекрытия является пересечение расчетной кривой импульсного напряжения и ВСХ. Критическая крутизна соответствует случаю, когда максимум кривой напряжения касается ВСХ (рис. 7).

Критической крутизной для подстанции в целом является наименьшее из полученных значений $U'_{\text{кр}}$ для всего установленного оборудования.

Критической крутизне волны, набегающей на подстанцию, соответствует критическая длительность фронта:

$$\tau_{\text{ф,кр}} = U_{50\%} / U'_{\text{кр}}. \quad (2)$$

Длительность фронта волны, приходящей на подстанцию, складывается из начальной длительности в месте перекрытия линейной изоляции $\tau_{\text{ф,0}}$ и удлинения фронта волны при движении вдоль линии:

$$\tau_{\text{ф}} = \tau_{\text{ф,0}} + \Delta\tau_{\text{ф}}x, \quad (3)$$

где x – расстояние от места перекрытия изоляции на линии до подстанции, км; $\Delta\tau_{\text{ф}}$ – удлинение фронта волны под действием импульсной короны, которое можно приближенно оценить по эмпирической формуле:

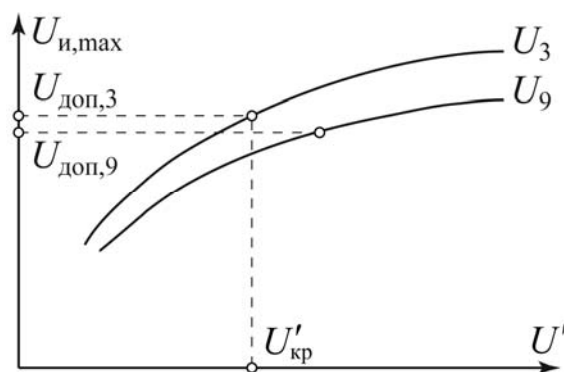


Рис. 6. Определение критической крутизны для внутренней изоляции

U_3, U_9 – максимальные расчетные напряжения на измерительном и силовом трансформаторах; $U_{доп,3}, U_{доп,9}$ – допустимые напряжения для измерительного и силового трансформаторов

$$\Delta \tau_{\phi} = \left(0,5 + \frac{0,008 U_{50\%}}{h_{\text{cp}}} \right) \frac{1}{k} \text{ [мкс/км]}, \quad (4)$$

где k – коэффициент, равный 1,0; 1,1; 1,45; 1,55 при числе проводов в фазе соответственно 1, 2, 3, 4 и более. В формулу (4) среднюю высоту подвеса фазного провода h_{cp} следует подставлять в метрах, а $U_{50\%}$ – в киловольтах.

При наличии на линии молниезащитных тросов, большинство перекрытий происходит с опоры на провод (обратные перекрытия). В этом случае напряжение практически мгновенно возрастает до $U_{50\%}$, следовательно, начальная длительность фронта может быть принята равной нулю. При $\tau_{\phi,0} = 0$ из соотношений (2) и (3) можно определить минимальное расстояние $x_{\text{кр}}$, при пробеге которого крутизна изначальной прямоугольной волны становится меньше критической:

$$x_{\text{кр}} = \frac{U_{50\%}}{U'_{\text{кр}} \Delta \tau_{\phi}}.$$

Обратные перекрытия, возникающие на расстоянии от подстанции, меньшем $x_{\text{кр}}$, могут приводить к повреждениям изоляции подстанционного электрооборудования, поэтому расстояние $x_{\text{кр}}$ называют длиной *опасной зоны*. Для схемы ОРУ, показанной на рис. 4, ожидаемое число повреждений изоляции подстанции в нормальном режиме (выключатели В-1 и В-2 включены, В-3 – отключен) за год равно ожидаемому числу перекрытий в пределах опасной зоны:

$$\beta_3 = n_{\text{уд}} \left[P_{\alpha} P_{\text{пр}} + (1 - P_{\alpha}) (\Delta_{\text{оп}} P_{\text{оп}} + \Delta_{\text{тр}} P_{\text{тр}}) \right] \frac{D_{\text{г.ч}}}{100} \sum_{i=1}^{n_{\text{л}}} \frac{x_{\text{кр},i}}{100},$$

где $n_{\text{уд}} = 4h_{\text{тр,ср}}$ – удельное число ударов молнии на 100 км длины линии за 100 грозовых часов; $h_{\text{тр,ср}}$ – средняя высота подвеса троса; P_{α} – вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту; $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{оп}}$, $P_{\text{тр}}$ – вероятности перекрытия линейной изоляции при ударах молнии в провод, опору и трос соответственно; $\Delta_{\text{оп}} = 4h_{\text{оп}}/l_{\text{прол}}$ – доля ударов молнии в опору ($h_{\text{оп}}$ – высота опоры; $l_{\text{прол}}$ – длина пролета); $\Delta_{\text{тр}} = (1 - \Delta_{\text{оп}})$ – доля ударов молнии в трос; $D_{\text{г.ч}}$ – среднее число грозовых часов в году; $n_{\text{л}}$ – число подходящих к подстанции линий; $x_{\text{кр},i}$ – длина опасной зоны при набегании волны по i -ой линии.

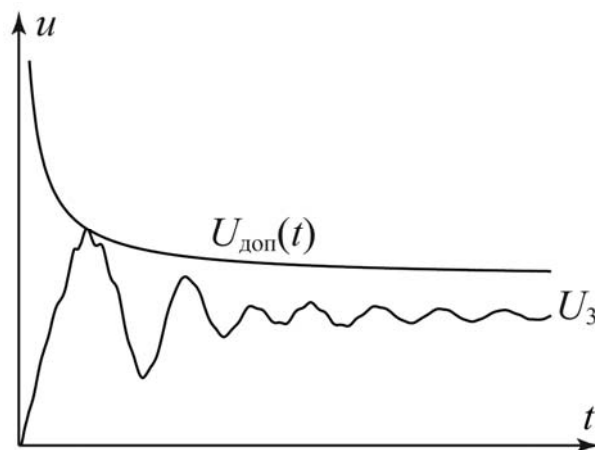


Рис. 7. Определение критической крутизны для внешней изоляции

U_3 – напряжение на трансформаторе напряжения; $U_{\text{доп}}(t)$ – ВСХ внешней изоляции трансформатора напряжения

Вероятность P_α весьма мала (0,1 – 1%) и тросовая защита линии в пределах опасной зоны служит для снижения общего числа перекрытий. Это актуально не только для снижения числа повреждений изоляции электрооборудования, но и для надежной работы вентиляльных разрядников, так как при ближних ударах молнии через них протекают токи, превышающие токи их термической стойкости (5 ÷ 14 кА). Дело в том, что при ближних ударах молнии процесс на подстанции необходимо рассматривать с учетом переотражений волн от места перекрытия. Схема « $2u_{\text{пад}}$ » в этом случае оказывается несправедливой и волновое сопротивление линии уже не ограничивает ток через РВ. Этот ток определяется распределением тока молнии между сопротивлением заземления опоры в точке перекрытия и сопротивлением РВ или ОПН, достигая десятков килоампер. ОПН способны выдерживать такие термические воздействия, но протекание через них токов, превышающих координационные, приводит к возрастанию остающихся напряжений и, следовательно, к росту вероятности повреждений изоляции.

Повышению надежности защиты ПС способствует снижение импульсных сопротивлений заземления в пределах опасной зоны, так как оно существенно влияет на вероятности обратных перекрытий (а при наличии тросовой защиты обратные перекрытия являются основным источником опасных волн). Участок трассы ВЛ, прилегающий к ПС, на котором выполнены мероприятия по обеспечению малого сопротивления заземления опор и оптимизации тросовой защиты носит название защищенного подхода.

ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ

1. По ошиновке распространяется волна с косоугольным фронтом (рис. 8). В конце ошиновки (точка A) установлена сосредоточенная емкость $C = 1500$ пФ. Амплитуда косоугольного импульса напряжения $U_{\text{max}} = 660$ кВ, длительность фронта $\tau_\phi = 1$ мкс, волновое сопротивление ошиновки $Z_c = 400$ Ом. Рассчитать и построить графики напряжения в точке A в течение времени $T = 5$ мкс с учетом и без учета емкости. При решении задачи воспользоваться следующими операторными преобразованиями:

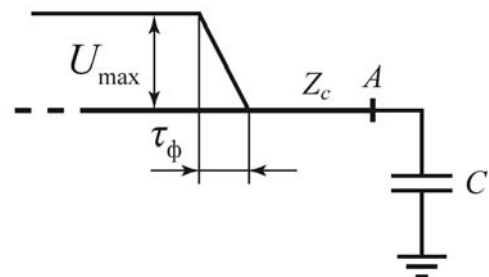


Рис. 8. К задаче 1

$$at \Leftrightarrow \frac{a}{p^2}; \quad e^{-at} + at - 1 \Leftrightarrow \frac{a^2}{p^2(p+a)}.$$

2. Рассчитать и построить зависимости максимального напряжения на изоляции электрооборудования от расстояния между этим оборудованием и защитным аппаратом в схеме рис. 1,а. Рассмотреть в качестве защитных

аппаратов сначала вентильные разрядники РВС-110 и РВМГ-110, а затем нелинейный ограничитель перенапряжений ОПН-П-110/73/10/650. Данные для расчетов: номинальное напряжение 110 кВ; максимальное значение напряжения набегающей волны 660 кВ; крутизна фронта волны 330 кВ/мкс; расстояние между оборудованием и защитным аппаратом $10 \div 300$ м. Остающиеся напряжения РВ и ОПН взять из Приложения 2 для тока 5 кА. Емкость оборудования C принять равной нулю.

3. На рис. 9 показана схема ОРУ 110 кВ, а на рис. 10,а – ее расчетная схема замещения. На рис. 10,б показана упрощенная схема, используемая в лабораторной работе для исследования грозовых перенапряжений. Рассчитать по правилу моментов (Приложение 4) значения эквивалентных емкостей в узлах упрощенной схемы. Нарисовать упрощенную схему замещения ОРУ 110 кВ и нанести на нее значения эквивалентных емкостей и расстояний между узлами.

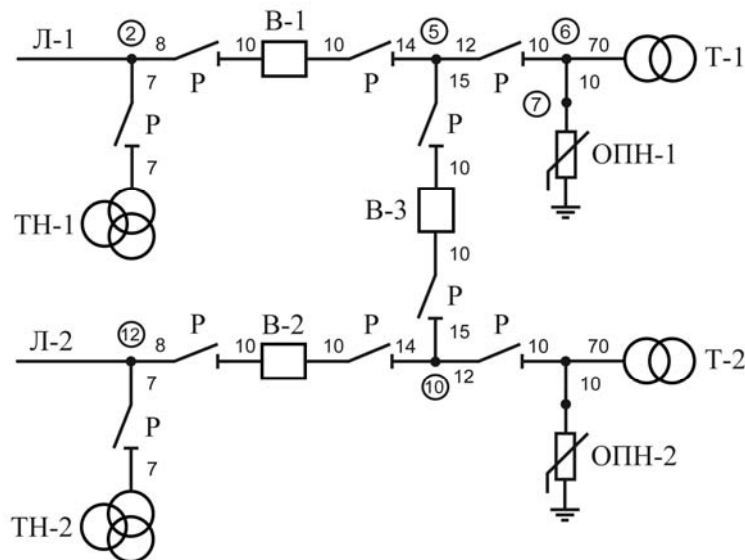


Рис. 9. Схема ОРУ 110 кВ

Л-1, Л-2 – подходящие воздушные линии электропередачи; ТН-1, ТН-2 – трансформаторы напряжения; Т-1 – силовой трансформатор; В-1, В-2 – масляные выключатели; Р – разъединители

ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ

1. Составить расчетную модель для задачи из п.1 предварительной подготовки (рис. 8). Рассчитать напряжение в точке А с учетом и без учета емкости электрооборудования. Сопоставить расчетные напряжения с ранее полученными результатами.

2. Построить зависимость максимального напряжения на изоляции электрооборудования $U_{и,макс}$ для обеих схем рис. 2 от расстояния l между

ОПН и защищаемым оборудованием, включенным до и после ОПН по ходу движения волны. Емкость оборудования принять равной $C = 1500$ пФ, импульсную прочность гирлянд линейной изоляции $U_{50\%} = 660$ кВ, длительность фронта волны $\tau_{фр} = 2$ мкс, волновое сопротивление линии и ошиновки $Z_c = 400$ Ом.

3. Рассмотреть влияние отходящих линий на перенапряжения в схеме рис. 1,а. Установить длину ошиновки $l = 100$ м и включить эквивалентное сопротивление $Z_{эКВ} = 300$ Ом между проводом ошиновки и землей на расстоянии l_1 от точки 1, равном 0, 50 и 100 м. Измерить напряжение на емко-

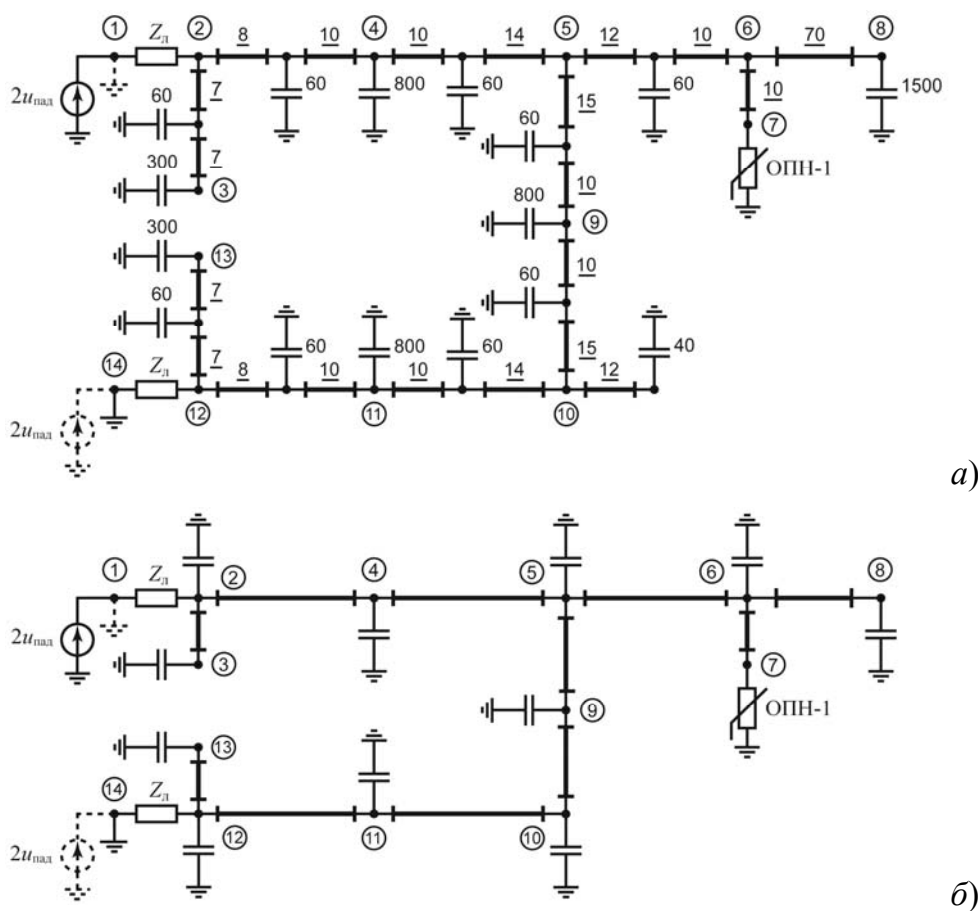


Рис. 10. Схема замещения ОРУ 110 кВ при отключенном выключателе В-3
а – полная; б – упрощенная

сти C . Повторить опыт при $Z_{эКВ} = 150$ Ом и $Z_{эКВ} = 75$ Ом. Построить зависимости максимальных напряжений на изоляции $U_{и,мак}$ от l_1 и сделать вывод относительно влияния числа и местоположения отходящих линий на условия защиты подстанции.

4. Определить надежность защиты подстанции 110 кВ (рис. 9) при работе с одним трансформатором Т-1 и защитным аппаратом ОПН-1 при замкнутой перемычке (выключатель В-3 включен). Создать расчетную мо-

дель для упрощенной схемы замещения (рис. 10,б) и провести расчет для случая падения волны напряжения по линии Л-1, для чего подключить источник косоугольного напряжения к точке 1 и заземлить точку 14. Измерить напряжения в точках 3 и 8 упрощенной схемы при изменении длительности фронта волны $\tau_{\text{ф}}$ от 4 до 0,5 мкс. По результатам измерений построить зависимость $U_{\text{и,мак}} = f(U')$, определить критическую крутизну $U'_{\text{кр1}}$ для внутренней и внешней изоляции и вычислить длину опасной зоны $x_{\text{кр1}}$ для линии Л-1.

5. Повторить опыт п. 4 для случая падения волны напряжения по линии Л-2, для чего подключить источник косоугольного напряжения к точке 14 и заземлить точку 1. Измерить напряжения в точках 13 и 8. Построить зависимость $U_{\text{и,мак}} = f(u')$, определить критическую крутизну $U'_{\text{кр2}}$ и длину опасной зоны $x_{\text{кр2}}$ для линии Л-2.

6. Учитывая равную вероятность падения волны по обеим линиям, определить число повреждений изоляции оборудования подстанции в год. Данные для расчетов: среднее число грозových часов $D_{\text{г.ч.}} = 30$ ч/год; средняя высота подвеса фазного провода $h_{\text{ср}} = 10$ м; средняя высота подвеса молниезащитного троса $h_{\text{тр,ср}} = 15$ м; высота опоры $h_{\text{оп}} = 19$ м; длина пролета $l_{\text{прол}} = 150$ м; вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в опору $P_{\text{оп}} = 0,3$; вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в трос $P_{\text{тр}} = 0,1$; вероятность прорыва молнии через тросовую защиту $P_{\alpha} = 0,01$; вероятность перекрытия при ударе молнии в провод $P_{\text{пр}} = 0,97$.

7. Выполнить пункты 4 – 6 для случая применения в качестве защитного аппарата вентильного разрядника РВС-110.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы параметры источника, включаемого в схему замещения подстанции при исследовании перенапряжений, вызванных набегающими волнами?
2. Может ли набегающая на подстанцию волна иметь вертикальный фронт?
3. Перечислите факторы, влияющие на уровень грозových перенапряжений на подстанции.
4. Какие преимущества дает защита изоляции электрооборудования подстанции ОПН по сравнению с РВ?
5. Почему ОПН можно эксплуатировать без искрового промежутка, а вентильный разрядник нельзя?
6. Нарисуйте типичную форму импульсного напряжения на электрооборудовании, расположенном до и после защитного аппарата по ходу волны.
7. Как представляются отходящие линии в схеме замещения подстанции при расчете грозových перенапряжений?

8. Почему трансформатор представляется в расчетной схеме емкостью?
9. В течение какого времени справедлива схема « $2u_{\text{пад}}$ »?
10. На какой подстанции (тупиковой, проходной, с большим числом отходящих линий) перенапряжения могут быть наибольшими?
11. Влияет ли место включения отходящей линии на перенапряжения на изоляции электрооборудования?
12. С каким напряжением, характеризующим электрическую прочность изоляции, надо сравнивать расчетное напряжение на внешней изоляции электрооборудования?
13. С каким напряжением, характеризующим электрическую прочность изоляции, надо сравнивать расчетное напряжение на внутренней изоляции электрооборудования?
14. Какой параметр используется в качестве показателя надежности защиты подстанции от набегающих волн? Каковы его допустимые значения?
15. Что такое критическая крутизна фронта набегающей волны?
16. Что такое опасная зона? От чего зависит длина опасной зоны?
17. Зависит ли критическая крутизна набегающей волны от расположения оборудования и схемы подстанции?
18. Зависит ли опасная зона от конструкции линии?
19. Как влияет число отходящих линий на среднее число лет безаварийной работы подстанции?
20. Зависит ли число лет безаварийной работы подстанции от импульсного сопротивления заземления опор отходящих линий?
21. Какова роль тросовой защиты линии в пределах защищенного подхода?
22. Какую модель ошиновки нужно использовать в расчетах волновых переходных процессов на подстанции?
23. Перечислите основные мероприятия по защите подстанции от набегающих волн.

УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ МОДЕЛИ И ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

Предварительные сведения о работе со стендом

Лабораторный стенд «Компьютерная высоковольтная лаборатория» создан на базе программы **EMTLab**, разработанной на кафедре ТЭВН МЭИ. Расчетная модель подстанции для расчета грозовых перенапряжений показана на рис. 11.

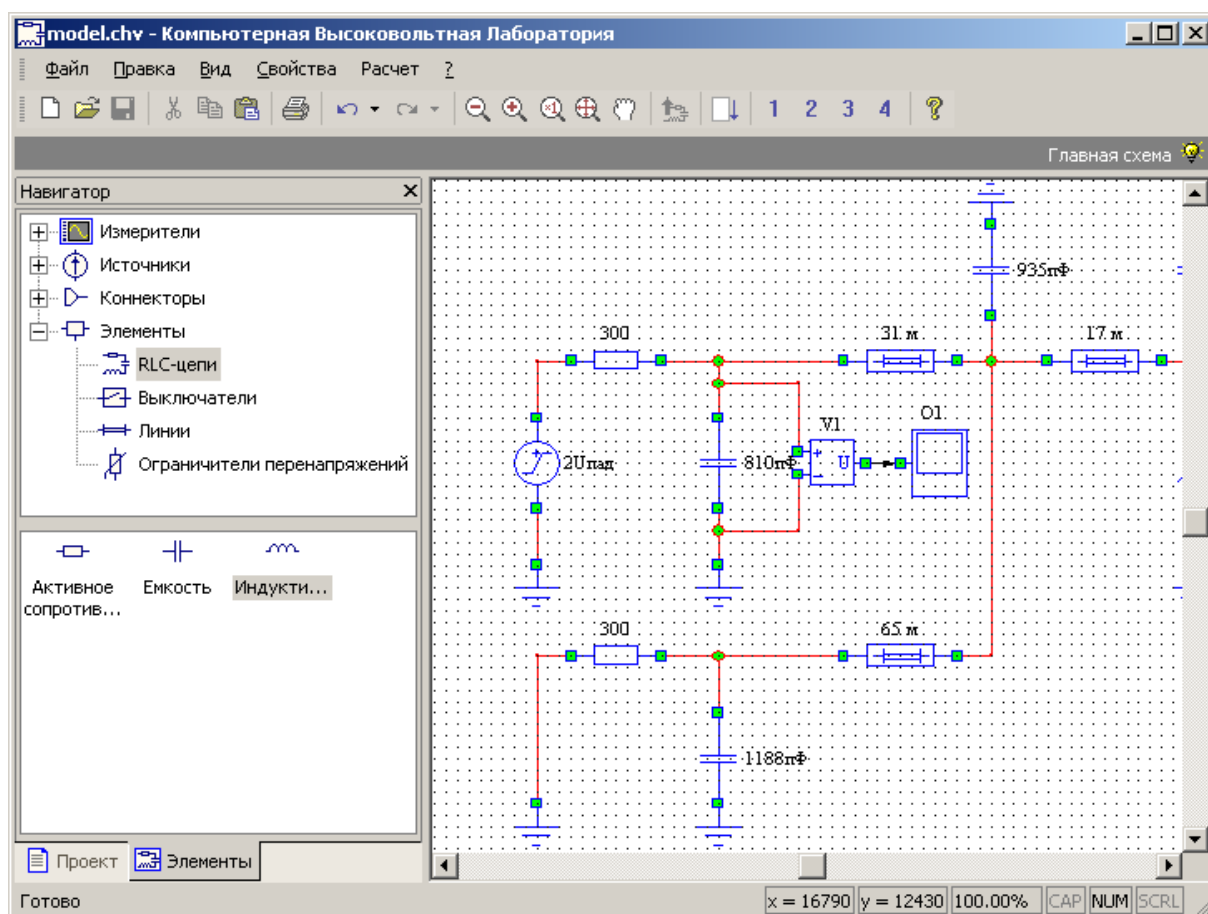


Рис. 11. Расчетная модель подстанции в программе «Компьютерная высоковольтная лаборатория»

Для добавления соединений необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по узлу элемента или общему узлу нескольких соединений, что автоматически переводит программу в режим рисования соединений. При последующих нажатиях левой кнопки мыши будет выполняться добавление промежуточных точек в создаваемое соединение. Для завершения ри-

сования нового соединения необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по требуемому конечному узлу. Для отмены добавления нового соединения во время его рисования можно воспользоваться пунктом «Отменить соединение» контекстного меню, доступного по нажатию правой кнопки мыши, или клавишей **Esc**.

Для удаления элементов или соединений из схемы необходимо сначала выделить их, а затем нажать клавишу **Delete**. Для копирования элементов и соединений также необходимо сначала выделить их, а затем воспользоваться кнопкой «Копировать» **Панели инструментов** или комбинацией клавиш **Ctrl + C**. Для удаления объектов из схемы и помещения их в буфер для последующей вставки можно воспользоваться кнопкой «Вырезать» **Панели инструментов** или комбинацией клавиш **Ctrl + X**. Вставка скопированных (или «вырезанных») ранее объектов выполняется с помощью кнопки «Вставить» **Панели инструментов** или нажатием комбинации клавиш **Ctrl + V**.

Для масштабирования схемы и быстрой навигации по ней можно воспользоваться кнопками «Увеличить», «Уменьшить», «Показать все» и «Перетащить» в **Панели инструментов** или в контекстном меню, доступном по нажатию правой кнопки мыши. Для удобства работы с программой эти режимы масштабирования также доступны с помощью колеса мыши. Так, увеличение и уменьшение схемы производится при прокрутке колеса мыши. При нажатии на колесо мыши и удерживании его в нажатом состоянии возможно перемещение схемы. В свою очередь, автоматическое масштабирование «Показать все», позволяющее отобразить на экране целиком всю схему, осуществляется двойным щелчком по колесу мыши.

Измерение напряжений и токов в расчетной модели выполняется с помощью блоков **Вольтметр** и **Амперметр**. Для вывода измеренных значений напряжений и токов на экран используется блок вывода **Осциллограф**, в котором вывод расчетных осциллограмм выполняется в отдельном окне, открываемом по двойному щелчку мыши на блоке осциллографа. На одном осциллографе можно вывести несколько осциллограмм одновременно, их число определяется количеством входов (входных портов) осциллографа. Для того, чтобы изменить число входов (по умолчанию осциллограф имеет один входной порт), необходимо воспользоваться диалогом «Осциллограф», который вызывается с помощью пункта «Свойства» контекстного меню для выделенного осциллографа. Кроме того, с помощью этого диалога можно задать обозначения осей X и Y , а также числовые множители, которые используются для масштабирования сигналов при их отображении. Так, например, по умолчанию осциллограф выводит напряжение в вольтах, а время – в миллисекундах. В случае, если необходимо вывести напряжение в киловольтах, можно воспользоваться кнопкой «Параметры осей Y подграфиков» диалога «Осциллограф» и в появившемся

диалоге «*Параметры отображения осей Y осциллографа*» задать для всех входных портов множитель 0,001. В свою очередь, для отображения временных интервалов в микросекундах необходимо воспользоваться кнопкой «*Параметры осей X подграфиков*» диалога «*Осциллограф*» и затем в появившемся диалоге «*Параметры отображения осей X осциллографа*» задать множитель по оси X , равный 1еб.

Запуск схемы на расчет осуществляется по нажатию кнопки «*Расчет*» в **Панели инструментов** или функциональной клавиши **F5**.

Указания по составлению схемы и выполнению расчетов

Блоки, используемые в этой лабораторной работе, сведены в табл. 3.

По завершении сборки расчетной схемы перед ее запуском на счет необходимо задать параметры расчета (пункт «*Параметры расчета*» в меню «*Расчет*» программы). Шаг расчета следует принять равным 0,001 мкс, а время счета – 20 мкс.

Для определения максимальных напряжений на электрооборудовании следует по окончании расчета открыть осциллограмму напряжения двойным щелчком мыши по блоку **Осциллограф**. Далее, дважды щелкнув мышью по расчетной осциллограмме, открыть диалоговое окно «*Свойства кривой*». В появившемся диалоге на закладке «*Информация*» максимальное расчетное значение напряжения отображается в поле «*Максимальное значение координаты Y*».

Для удобства обработки результатов для каждого пункта задания в программе имеется табличная форма, вызываемая путем нажатия кнопки с номером пункта задания в **Панели инструментов**. Найденные значения максимальных напряжений следует ввести в таблицу и, по окончании ее заполнения, нажать кнопку «*Построить график*».

По итогам выполнения работы, полученные табличные формы и графики целесообразно сохранить путем их копирования и вставки в доступный на компьютере текстовый редактор **WordPad**. Для копирования в буфер обмена табличных форм можно воспользоваться комбинацией клавиш **Alt + Print Screen**. Графики можно скопировать в буфер обмена или сохранить в файл с помощью меню **Правка** окна графопостроителя **XYGraph** (пункты «*Копировать рисунок*» и «*Сохранить рисунок*» соответственно).

Элементы расчетной модели, используемые в лабораторной работе

Элемент	Описание
	<p><i>Источник косоугольного импульса</i>, моделирующий набегающие с линии электромагнитной волны.</p> <p><i>Параметры:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – амплитудное значение напряжения, кВ; – крутизна фронта, кВ/мкс. <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Источники → Неуправляемые.</p>
	<p><i>Активное сопротивление</i> для представления волновых сопротивлений воздушных линий.</p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → RLC-цепи.</p>
	<p><i>Емкость</i> для представления входных емкостей электрооборудования: трансформаторов, выключателей, разъединителей.</p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → RLC-цепи.</p>
	<p><i>Линия с распределенными параметрами</i>, предназначенная для моделирования ошинок.</p> <p><i>Параметры:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – длина, км; – волновое сопротивление, Ом; – скорость распространения, м/с. <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → Линии.</p>
	<p><i>Нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН).</i></p> <p>Параметры ОПН задаются таблицей импульсных токов (кА) и соответствующих им остающихся напряжений (кВ).</p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → Ограничители перенапряжений.</p>
	<p><i>Аналоговый заземлитель.</i></p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Коннекторы → Заземлители.</p>
	<p><i>Вольтметр.</i></p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Измерители → Непрерывные.</p>
	<p><i>Цифровой осциллограф.</i></p> <p><i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Измерители → Блоки вывода.</p>

Механизм формирования набегающих волн

Можно выделить три основных случая прямого поражения молнией ВЛ с тросами (рис. П1.1):

- 1) удар молнии в фазный провод при прорыве сквозь тросовую защиту (или при отсутствии таковой);
- 2) удар молнии в вершину опоры;
- 3) удар молнии в молниезащитный трос.

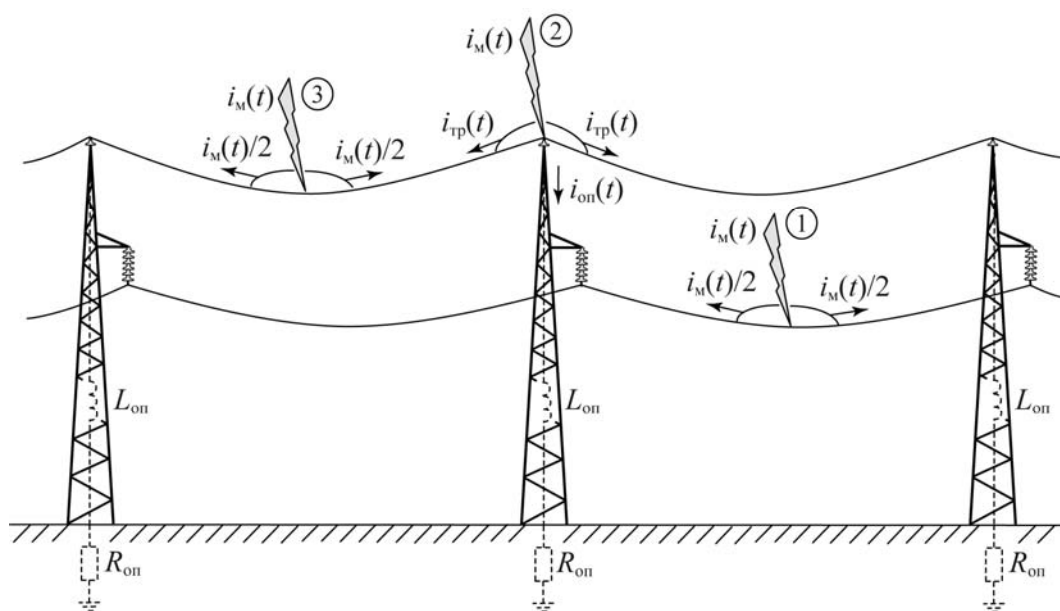


Рис. П1.1. Расчетные случаи поражения ВЛ молнией

В первом случае на фазном проводе сразу формируются две электромагнитные волны, движущиеся в противоположные стороны по волновым каналам линии. Рассматривая задачу приближенно в однофазной постановке можно принять для линии волновое сопротивление прямой последовательности Z_c . Тогда напряжение бегущей по линии волны можно оценить приближенно следующим образом:

$$u_{\text{в}}(t) = Z_c \frac{i_{\text{м}}(t)}{2}.$$

Так как ток молнии достигает своего амплитудного значения (десятки килоампер) за время порядка нескольких микросекунд, то на ближайшей к точке удара молнии гирлянде изоляторов напряжение начинает быстро нарастать. Гирлянда изоляторов обладает импульсной электрической прочностью, которая имеет статистический разброс. В расчетах импульсную прочность

гирлянды принимают равной 50%-ному разрядному напряжению $U_{50\%}$ – максимальному значению стандартного грозового импульса напряжения (1,2/50 мкс), при котором разряд наступает в 50% всех случаев подачи напряжения. Как только напряжение на гирлянде изоляторов превысит ее импульсную прочность, произойдет перекрытие гирлянды, и большая часть тока стечет в землю по заземлителю опоры. В сторону подстанции отправится волна, ограниченная по амплитуде импульсной прочностью гирлянды $U_{50\%}$.

При ударе молнии в опору напряжение на фазном проводе ВЛ сначала определяется только составляющими, индуктированными электромагнитным полем канала молнии. Большая часть тока молнии протекает по опоре, создавая падение напряжения на индуктивности опоры $L_{оп}$ и на импульсном сопротивлении ее заземлителя $R_{оп}$. Если ток молнии и крутизна его фронта окажутся достаточно большими, то разность потенциалов между вершиной опоры и фазным проводом превысит импульсную прочность гирлянды изоляторов, что приведет к *обратному перекрытию*. При этом на фазном проводе практически мгновенно появится напряжение и по линии в сторону подстанции отправится волна с отвесным фронтом.

При ударе молнии в трос ток молнии растекается между соседними опорами. При этом возможно возникновение как обратного перекрытия гирлянды изоляторов на опоре, так и пробоя воздушного промежутка «молниезащитный трос-фазный провод». В обоих случаях на фазном проводе ВЛ формируются волны с отвесным фронтом, движущиеся в сторону подстанции.

Во всех трех случаях грозового поражения ВЛ от места перекрытия в сторону подстанции движется электромагнитная волна, амплитуда которой может быть принята равной $U_{50\%}$. Если эта волна образовалась в результате обратного перекрытия, то ее начальная длительность фронта $\tau_{ф,0}$ может быть в расчетах принята равной нулю.

Приложение 2

Принцип работы и характеристики вентильных разрядников и ОПН

Простейшим устройством защиты от грозовых перенапряжений является искровой промежуток (ИП), пробивное напряжение которого скоординировано с электрической прочностью защищаемого электрооборудования. Вольт-секундная характеристика ИП должна быть ниже электрической прочности изоляции оборудования во всем диапазоне длительностей фронта воздействующих напряжений. Поскольку ИП устанавливается параллельно оборудованию, то его пробой шунтирует защищаемый объект, исключая возможность повреждения изоляции. По окончании воздействия импульса грозовых перенапряжений разряд в ИП под действием рабочего напряжения

сети переходит в силовую электрическую дугу, тем самым образуя устойчивое замыкание. Поэтому необходимо обеспечить гашение дуги.

В устройствах, получивших название *вентильных разрядников* (РВ), гашение дуги сопровождающего тока обеспечивается включением последовательно с ИП нелинейного резистора (НР), вольт-амперная характеристика которого показана на рис. П2.1. При напряжении, соответствующем пробивному напряжению ИП, сопротивление НР мало, а падение напряжения на нем не превышает допустимого напряжения защищаемого электрооборудования. При снижении напряжения до рабочего сопротивление НР резко возрастает, ограничивая ток через ИП.

Как следствие, при прохождении тока промышленной частоты через нулевое значение дуга в ИП гаснет и восстанавливается нормальный режим работы. Назначение ИП при этом сводится к защите НР от токов промышленной частоты, которые при длительном протекании через него приводят к его термическому разрушению.

Падение напряжения на нелинейном резисторе РВ при

протекании через него импульсного тока называется *остающимся напряжением* $U_{ост}$. Значения $U_{ост}$ при различных значениях импульсных токов приведены для типовых конструкций РВ в табл. П2.1. Наибольшее значение $U_{ост}$, возникающее на РВ в ходе переходного процесса, должно быть меньше допустимого напряжения электрооборудования на величину координационного интервала ΔU_k , составляющего 20 – 50 % от допустимого в зависимости от класса напряжения сети (меньшие значения соответствуют большему номинальному напряжению). Выбор значения $U_{ост}$ осуществляется при определенном значении импульсного тока, называемого *током координации* I_k .

Ток координации должен быть достаточно большим, чтобы при воздействии набегающих волн протекающие через РВ токи не превышали значение I_k . В этом случае значения $U_{ост}$ будут удовлетворять координационному интервалу. С другой стороны, ток координации должен быть меньше тока термической стойкости РВ, который в зависимости от конструкции разрядника и материала резисторов находится в диапазоне 5 ÷ 14 кА.

Столь малые значения тока термической стойкости создают предпосылки для выхода их из строя при ближних ударах молнии, когда ток молнии растекается между заземлителем опоры и РВ. К недостаткам вентиль-

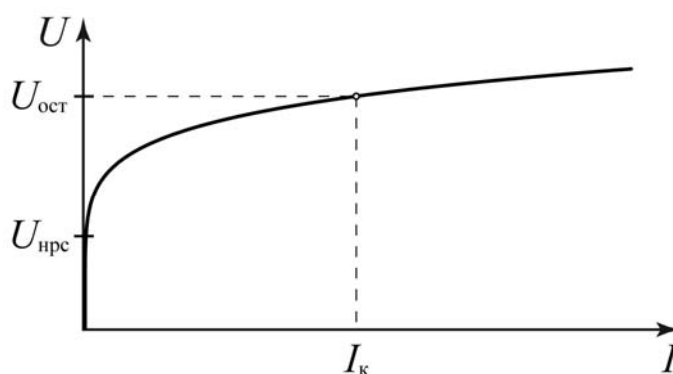


Рис. П2.1. Вольт-амперная характеристика РВ
 $U_{нрс}$ – наибольшее рабочее напряжение сети;
 $U_{ост}$ – остающееся напряжение при токе координации I_k

ных разрядников также следует отнести статистический разброс разрядных напряжений ИП и необходимость согласования вольт-секундных характеристик ИП и защищаемой изоляции.

В настоящее время на смену РВ пришли ОПН (ограничители перенапряжений нелинейные). Нелинейный резистор ОПН состоит из варисторов, выполненных на основе оксида цинка (ZnO). Вольт-амперные характеристики варисторов обладают столь высокой нелинейностью, что ОПН способны находиться под рабочим напряжением без потери термической устойчивости. Поэтому ограничители могут в большинстве случаев эксплуатироваться без искрового промежутка, что удешевляет конструкцию и улучшает их защитные свойства.

Подробное изложение конструктивных особенностей и характеристик РВ и ОПН содержится в [1]. Значения $U_{ост}$ при различных значениях импульсных токов приведены для типовых конструкций ОПН в табл. П2.2.

Таблица П2.1. Электрические характеристики РВ 110 кВ

Тип разрядника	Напряжение, кВ					
	наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение	пробивное	импульсное пробивное при временах 1,5–20 мкс	остающееся при импульсном токе с длительностью фронта 8 мкс и амплитудой, А		
				3000	5000	10000
действующее значение			амплитудное значение			
РВМГ-110	100	170 – 195	260	245	265	295
РВС-110	100	200 – 250	285	315	335	367

Таблица П2.2. Электрические характеристики ОПН 110 кВ

Тип ОПН	Напряжение, кВ					
	наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение	остающееся при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, А				
		500	5000	10000	20000	
действующее значение		амплитудное значение				
ОПН-П-110/73/10/650	73	188	230	249	280	
ОПН-П-110/80/10/650	80	206	252	274	308	
ОПН-П-110/88/10/650	88	216	264	287	322	
ОПН-П-110/73/10/900	73	180	208	224	237	
ОПН-П-110/80/10/900	80	198	229	247	271	

Волновые процессы при набегании электромагнитной волны на узел неоднородности

Процессы, протекающие на подстанции при воздействии набегающих с линии волн, кратковременны. Их длительность составляет десятки микросекунд, а максимальные перенапряжения возникают в течение нескольких микросекунд переходного процесса. Длительности фронта воздействующих напряжений оказываются соизмеримыми с временами пробега волн по участкам ошиновки распределительного устройства, что приводит к необходимости учета волнового характера процессов при качественном анализе и в численном моделировании.

Если предположить, что электромагнитная волна распространяется только по одному волновому каналу линии электропередачи (с параметрами прямой последовательности), то задачу расчета волнового переходного процесса на подстанции можно решать в однофазной постановке. На рис. ПЗ.1,а показан случай набегания волны напряжением $u_{\text{пад}}$ по однопроводной линии с волновым сопротивлением Z_c . Электрооборудование подстанции на рисунке показано двухполюсником, подключенным к линии в точке A .

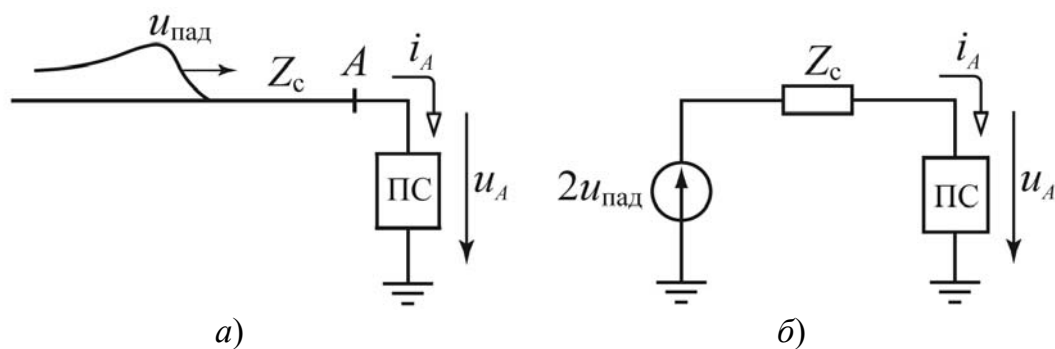


Рис. ПЗ.1. Набегание волны на узел неоднородности
а – поясняющая схема; б – расчетная схема замещения

В соответствии с общим решением волновых уравнений линии [2] напряжение в каждой ее точке (и, в частности, в точке A) представляет собой сумму двух волн, движущихся в противоположных направлениях, – падающей $u_{\text{пад}}$ и отраженной $u_{\text{отр}}$:

$$u_A = u_{\text{пад}} + u_{\text{отр}} \quad (\text{ПЗ.1})$$

Ток, протекающий через точку A , определяется разностью двух волн:

$$i_A = i_{\text{пад}} - i_{\text{отр}}. \quad (\text{ПЗ.2})$$

Напряжение u_B и ток i_B бегущей по линии волны пропорциональны друг другу:

$$u_B = Z_c i_B, \quad (\text{ПЗ.3})$$

где Z_c – волновое сопротивление линии, которое для прямой последовательности линий 110 – 750 кВ находится в диапазоне 250 ÷ 400 Ом.

Умножая (ПЗ.2) на Z_c и складывая с (ПЗ.1), получим с учетом (ПЗ.3):

$$2u_{\text{пад}} = Z_c i_A + u_A. \quad (\text{ПЗ.4})$$

Полученному соотношению соответствует схема замещения, показанная на рис. ПЗ.1,б, которая и используется при исследовании процессов на подстанции при воздействии набегающих волн. Заметим, что при выводе (ПЗ.4) содержимое двухполюсника, замещающего подстанцию, не раскрывалось, поэтому схема справедлива для любой компоновки электрооборудования на ПС.

При исследовании волновых процессов на подстанции необходимо учитывать отходящие от нее линии. В расчетной схеме замещения (например, в схемах рис. 1) отходящая линия может быть представлена своим волновым сопротивлением. Это представление справедливо до тех пор, пока в начале линии не появится отраженная волна, т.е. в течение двух времен пробега волны по отходящей линии. При этом напряжение в начале линии относится к втекающему в нее току так же, как соотносятся друг с другом напряжение и ток падающей волны, т.е. входное сопротивление линии определяется ее волновым сопротивлением.

Обычно время пробега волны по отходящей линии значительно больше характерных времен волнового процесса на подстанции, поэтому замещение отходящей линии волновым сопротивлением справедливо.

Участки ошинок на подстанции в схеме замещения представить волновыми сопротивлениями нельзя, так как время пробега волны по ним в большинстве практических случаев меньше длительности фронта набегающей волны. Поэтому задачи расчета грозовых перенапряжений на подстанции приходится решать с помощью численного моделирования на компьютере. Для расчета волновых процессов компьютерные программы используют для представления ошинок модели длинных линий, реализующие для учета конечного времени пробега волны по ошиновке метод бегущих волн.

Упрощение расчетной схемы замещения

При численном моделировании переходного процесса в схеме подстанции, время необходимое для расчета, в основном определяется количеством узлов в схеме и шагом расчета по времени. С помощью упрощений расчетной схемы можно уменьшить количество узлов, а, следовательно, и время для расчета. Уменьшение количества узлов достигается за счет переноса части емкостей в соседние узлы.

Перенос емкости из узла в соседние следует проводить по правилу моментов, т.е. при переносе каждую емкость следует разделить на две части, значения которых обратно пропорциональны расстояниям до соседних узлов. В качестве примера на рис. 5 показана последовательность преобразований фрагмента схемы замещения. В этом примере сначала переносится емкость C_3 из узла 3 в соседние узлы 2 и 4, а прилежащие к узлу 3 участки ошиновки длиной l_{23} и l_{34} объединяются в один участок длиной l_{24} (рис. 5,б). Значения емкостей C'_2 и C'_4 рассчитываются по следующим формулам:

$$C'_2 = C_2 + C_3 l_{34} / (l_{23} + l_{34}); \quad C'_4 = C_3 l_{23} / (l_{23} + l_{34}).$$

Аналогичным образом распределяется по соседним узлам полученная в ходе преобразований емкость C'_2 (рис. 5,в). Значения емкостей C_1 и C''_4 рассчитываются по формулам:

$$C_1 = C'_2 l_{24} / (l_{12} + l_{24}); \quad C''_4 = C'_4 + C'_2 l_{12} / (l_{12} + l_{24}).$$

Необходимо отметить, что при составлении упрощенной схемы замещения не следует распределять по соседним узлам емкости с относительно большими значениями. В противном случае это приведет к заметному расхождению результатов по полной и упрощенной схемам. Из сопоставления результатов расчета по полной и упрощенной схемам следует, что значение распределяемой по соседним узлам емкости не должно превышать 200 пФ.

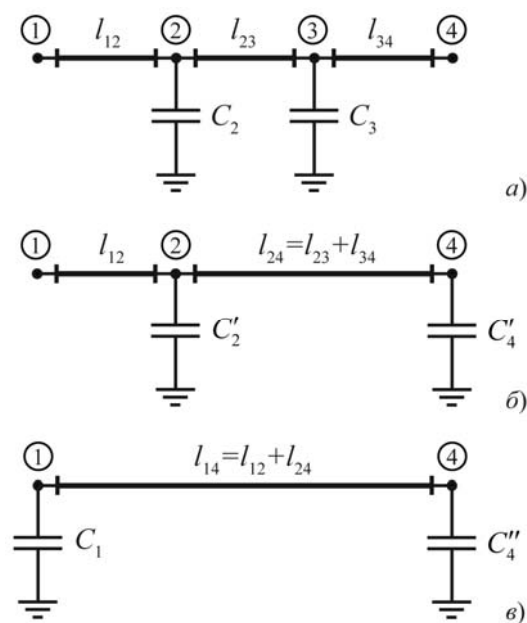


Рис. П4.1. Упрощение схемы замещения а – исходный фрагмент схемы; б – перенос емкости C_3 ; в – перенос емкости C'_2

Испытательные напряжения по ГОСТ 1516.3

Таблица П5.1

Нормированные испытательные напряжения полного и срезанного грозового импульса электрооборудования для классов напряжения 35–220 кВ (ГОСТ 1516.3-96)

Класс напряжения, кВ	Полный грозовой импульс, кВ		Срезанный грозовой импульс, кВ	
	Силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы	Трансформаторы напряжения	Силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы	Электромагнитные трансформаторы напряжения
35	190		220	
110	480		550	550
150	550	650	600	750
220	750	950	835	1100

Таблица П5.2

Нормированные испытательные напряжения полного и срезанного грозового импульса электрооборудования для классов напряжения 330–750 кВ (ГОСТ 1516.3-96)

Класс напряжения, кВ	Уровень изоляции	Полный грозовой импульс, кВ			Срезанный грозовой импульс, кВ	
		Силовые трансформаторы	Шунтирующие реакторы, электромагнитные трансформаторы напряжения	Емкостные трансформаторы напряжения	Силовые трансформаторы	Шунтирующие реакторы, электромагнитные трансформаторы напряжения
330	a	950	1050		1050	1175
	b	1050	1175		1150	1300
500	a	1300	1425		1400	1550
	b	1550	1675	1550	1650	1800
750	a	1800	1950		1950	2100
	b	2100	2250	2100	2250	2400

Примечание: уровень изоляции *a* – при применении для защиты ограничителей перенапряжений (ОПН); уровень изоляции *b* – при применении для защиты вентильных разрядников.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Техника высоких напряжений:** Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов/В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 1986.–464 с.: ил.
2. **Основы теории цепей:** Учебник для вузов/Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов.– 5-е изд., перераб.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–528 с.: ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ	3
ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ	13
ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ	14
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ МОДЕЛИ И ВЫПОЛНЕНИЮ	18
РАСЧЕТОВ	18
Предварительные сведения о работе со стендом	18
Указания по составлению схемы и выполнению расчетов	20
<i>Приложение 1. Механизм формирования набегающих волн</i>	<i>22</i>
<i>Приложение 2. Принцип работы и характеристики вентильных разрядников и ОПН... 23</i>	<i>23</i>
<i>Приложение 3. Волновые процессы при набегании электромагнитной волны на узел неоднородности</i>	<i>26</i>
<i>Приложение 4. Упрощение расчетной схемы замещения</i>	<i>28</i>
<i>Приложение 5. Испытательные напряжения по ГОСТ 1516.3</i>	<i>29</i>
ЛИТЕРАТУРА	30

Учебное издание

**Гилязов Марат Закирзянович, Ларин Василий Серафимович,
Матвеев Даниил Анатольевич**

Компьютерная лабораторная работа
«Защита подстанций от набегающих волн»

Методическое пособие по курсу

«Изоляция и перенапряжения»
для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика»

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2009(1),	метод.	Подписано в печать хх.хх.хх
Печать офсетная	Формат 60х84/16	Физ. печ. л. 2,0
Тираж 300 экз.	Изд. № хх	Заказ № ххх

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14
Отпечатано в типографии ФКП «НИИ «Геодезия», 141292, Московской обл.,
г. Красноармейск, просп. Испытателей, д. 14

© Московский энергетический институт
(технический университет), 2010