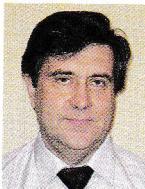


По материалам VI Российской конференции по молниезащите



Д. С. Шишигин



С. Л. Шишигин

Моделирование грозовых перенапряжений воздушных линий и электрических подстанций методами теории заземлителей

ШИШИГИН Д. С., канд. техн. наук
ШИШИГИН С. Л., доктор техн. наук
Вологодский государственный университет
160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15
shishigind@yandex.ru

Расчёты грозовых перенапряжений воздушных линий и электрических подстанций обычно проводят методами теории длинных линий в программе EMTP¹. Заземлители оказывают существенное влияние на волновые процессы в проводах и шинах, поэтому замена заземлителя со сложной 3D-геометрией сосредоточенным активным сопротивлением в EMTP-моделях сопряжена с погрешностями. Представлен альтернативный подход — на основе теории заземлителей с использованием программы «ЗУМ», позволяющей рассчитать волновые процессы в проводниках, расположенных в воздухе, совместно с процессами растекания тока в заземлителях. Максимум волн перенапряжения на силовом трансформаторе, вызванной перекрытием изоляции опоры воздушной линии, увеличивается на 20 % с учётом токов заземлителя подстанции, что показано на численном примере.

Ключевые слова: грозовые перенапряжения, программа EMTP, воздушная линия, обратное перекрытие изоляции, электрическая подстанция, заземлители, программа «ЗУМ».

При ударе молнии в грозозащитный трос, опору воздушной линии (ВЛ) с перекрытием изоляции или прорыве молнии на провода возникают волны перенапряжения, представляющие опасность для изоляции электрооборудования подстанции [1].

Решение задач грозозащиты наиболее часто проводят на основе теории длинных линий в программе EMTP. Достоинства такого подхода известны. К недостаткам относится слишком упрощённая модель заземлителя — активное сопротивление, измеренное на низкой частоте или взятое из нормативных документов. Более точные активно-реактивные RLC-модели заземлителей, учитывающие частотные характеристики входного сопротивления, получают при обработке данных импульсных экспериментов [2]. Однако этот путь сложен для инженерного применения. Кроме того, сосредоточенные модели не учитывают взаимные электромагнит-

ные связи заземлителя и шин подстанции.

Переход к единым 3D-моделям проводников подстанции и ВЛ в земле и воздухе повышает точность расчётов. Такую возможность предоставляют методы теории электромагнитного поля с программой FDTD². Однако для сложных, протяжённых 3D-систем тонких проводников ВЛ и подстанций данный подход слишком трудоёмкий.

Проводник в воздухе — частный случай проводника в земле (с нулевой проводимостью растекания). Отсюда возможность применения хорошо разработанных цепно-полевых математических моделей, методов и компьютерных программ расчёта заземлителей [3–5] для моделирования грозовых перенапряжений с проводниками, расположенными в земле и в воздухе [6].

Целью работы является 3D-моделирование грозовых перенапряжений ВЛ

и подстанций методами теории заземлителей.

Геометрическая модель подстанции с подключённой ВЛ (рис. 1) разрабатывается средствами AutoCAD. Электрооборудование подстанции моделируется входными ёмкостями [7, таблица П30], подключёнными к заземлителю подстанции (рис. 2). Железобетонные фундаменты опор ВЛ считаются проводящими. Грунт однослоистый с удельным сопротивлением $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Модель нелинейного ограничителя перенапряжений (ОПН) представляет собой резистор с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), который описывается статическим сопротивлением. На каждом временном шаге проводится два расчёта — с сопротивлением, полученным в начале и в конце шага. Через полученные точки проводится прямая линия, пересечение которой с ВАХ определяет текущее сопротивление ОПН.

Изолятор ВЛ моделируется ключом. Вначале ключ разомкнут. В момент времени t , мкс, когда напряжение на гирлянде изоляторов превысит вольтсекундную характеристику (ВСХ) [7]

$$U(t) = 340 / \left(1 + \frac{15}{t + 9.5} \right), \text{ кВ},$$

ключ замыкается, где t — длина гирлянды изоляторов.

Коронный разряд на проводах ВЛ моделируется динамической ёмкостью (на фронте волны) согласно модели ВНИИЭ [8]

$$C_d(u) = 4 / 3 \cdot C_0 \cdot B \cdot \sqrt[3]{u / U_0}, \\ du / dt > 0,$$

где C_0 — геометрическая ёмкость провода, u — напряжение провода, U_0 — начальное напряжение коронного разряда, коэффициент $B = 0,85$ при отрицательной полярности и $B = 1,02$ при положительной полярности.

Учёт частотных зависимостей внутреннего сопротивления проводников и земли, используемой в качестве обратного провода ВЛ, проводится по методике [3].

Расчёты грозовых перенапряжений выполнены в программе «ЗУМ» [5].

Рассмотрим удар молнии с током 100 кА длительностью 10/350 мкс в опору ВЛ (рис. 1). Обратное перекрытие изоляции происходит в момент времени, когда напряжение на изоля-

² FDTD — Finite Difference Time Domain (англ.) — метод конечных разностей во временной области.

¹ EMTP — ElectroMagnetic Transient Program.

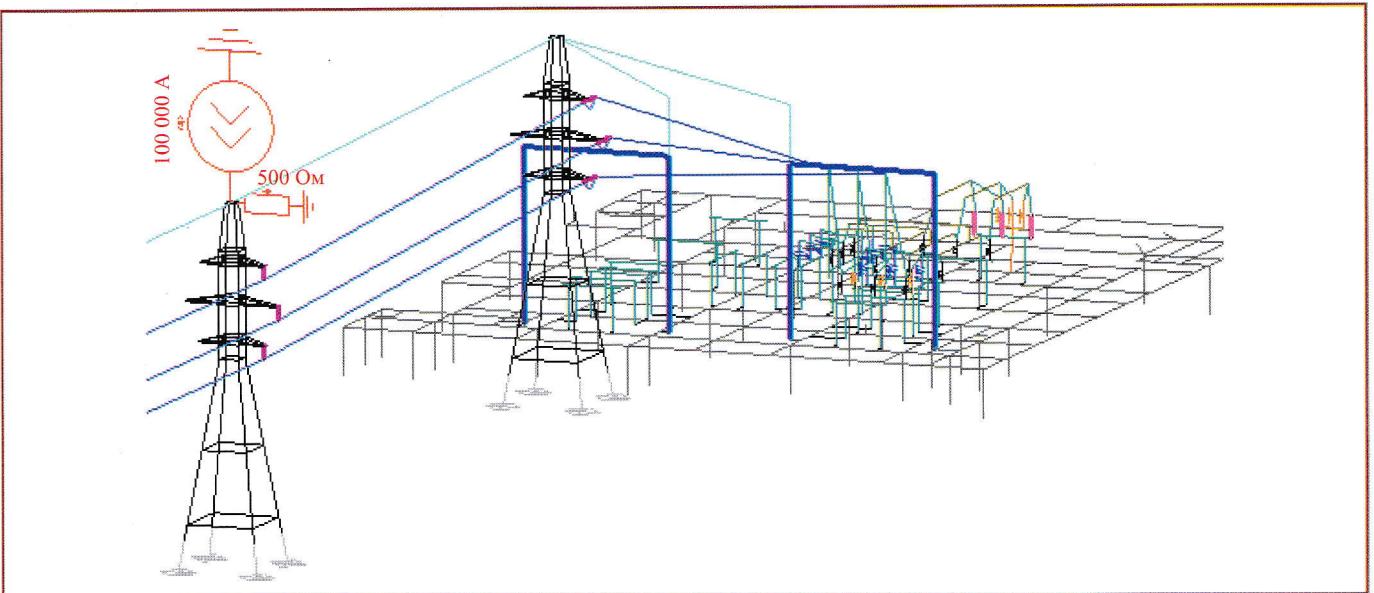


Рис. 1. Расчётная модель подстанции 150/10 кВ и ВЛ (три опоры ВЛ не показаны)

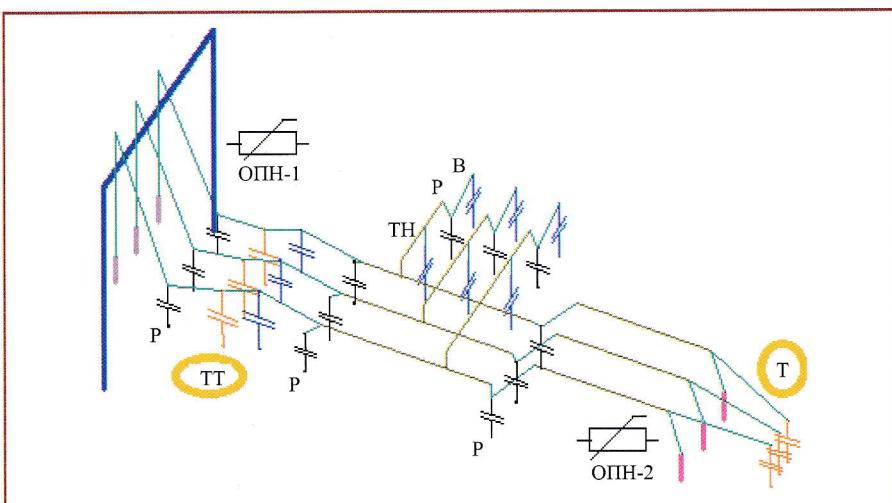


Рис. 2. Моделирование электрооборудования подстанции входными ёмкостями:

P — разъединитель, TT — трансформатор тока, B — выключатель, TH — трансформатор напряжения

ции $U = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}}$ превышает ВСХ изоляции, где $U_{\text{оп}}$ — напряжение опоры, $U_{\text{пр}}$ — напряжение провода.

Если не учитывать рабочее напряжение проводов, то первой перекрываются изоляции нижней фазы (рис. 3). Напряжение опоры почти одинаково для всех фаз (при большом сопротивлении заземлителя опоры), но нижняя фаза находится дальше от троса, поэтому напряжение провода, наведённое током троса, — наименьшее, а напряжение на изоляции — наибольшее. Волна тока в нижней фазе приводит к резкому возрастанию напряжения проводов и снижению напряжения на изоляции двух других фаз, поэтому далее перекрытие изоляции происходит с запаздыванием.

Учёт рабочего напряжения меняет порядок перекрытия фаз, ускоряет первое перекрытие, но мало влияет на

амплитуду волн перенапряжения (она определяется ВСХ изоляции). По данной причине рабочее напряжение проводов ВЛ (случайные величины в момент удара молнии) далее не учитывается.

Исследовали влияние канала молнии на перекрытие изоляции опоры ВЛ. Канал молнии, который моделировали вертикальным проводником длиной 100 м и более, увеличивает напряжение на стойке опоры через магнитные связи. Но при большом сопротивлении заземлителя (именно этот случай представляет опасность) напряжение стойки опоры меняется незначительно и влиянием канала молнии можно пренебречь.

При обратном перекрытии изоляции возникает волна перенапряжения с крутым фронтом независимо от формы тока молнии. Распространяясь по про-

водам, она может привести к перекрытию изоляции (уже прямому) соседних опор, а набегая на подстанцию, воздействует на изоляцию высоковольтного оборудования.

Снижение сопротивления заземлителя позволяет устраниить обратное перекрытие изоляции опоры ВЛ. С помощью 3D-моделирования легко проанализировать возможные варианты. Эффективным средством ограничения перенапряжений изоляции является соединение заземлителей ближайших опор с заземлителем подстанции.

Если перекрытие изоляции опоры ВЛ произошло, то волны перенапряжения с ВЛ попадают в шины подстанции, добегают и отражаются от ёмкости, которой моделируется силовой трансформатор, возвращаются к поражённой опоре (опорам), отражаются с изменением знака и вновь набегают на подстанцию. В результате возникает сложный колебательный процесс, медленно затухающий вследствие малого активного сопротивления проводов и шин. При близком к подстанции ударе молнии затухание электромагнитной волны в земле, а также влияние импульсной короны проводов ВЛ незначительно. При срабатывании ОПН и подключении заземлителя подстанции колебательные процессы усложняются.

Установка ОПН устраняет возникающие перенапряжения электрооборудования подстанции. Установка ОПН-2 вблизи силового трансформатора эффективней установки ОПН-1 вблизи портала (рис. 2), что подтверждает известные данные [1, 7]. ОПН-2 надёжнее, чем ОПН-1 защищает не только силовой трансформатор (рис. 4), но и трансформатор тока, который находится ближе к ОПН-1. Причина заключается в том, что ОПН-1 подключен к шинам подстанции через проводник

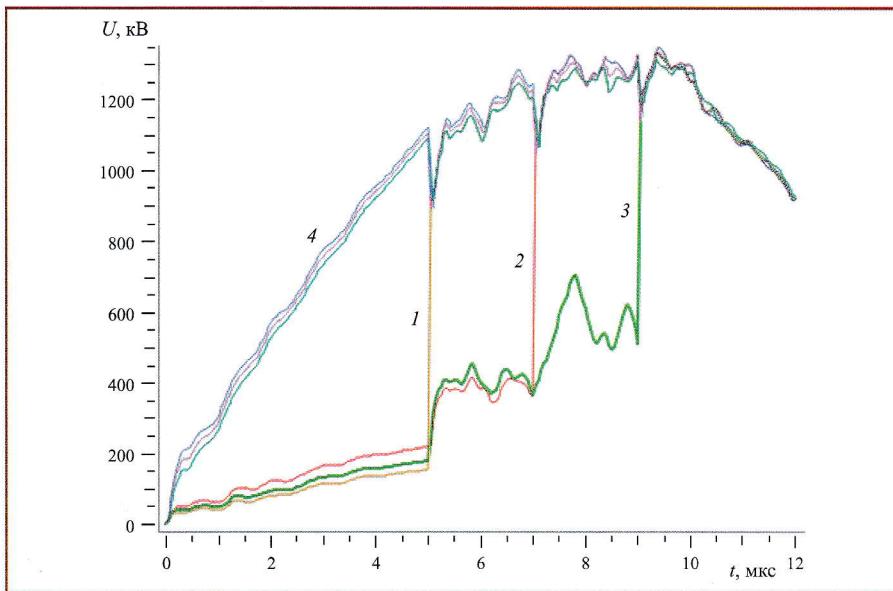


Рис. 3. Напряжение проводов ВЛ при ударе молнии с током 100 кА, 10/350 мкс с линейным фронтом в вершину опоры:

1 — нижнего; 2 — верхнего; 3 — среднего и 4 — опоры (рис. 1)

(шлейф) длиной 11 м, поэтому из-за большой индуктивности шлейфа он срабатывает с запаздыванием при прохождении волн перенапряжений с коротким фронтом.

Дальнейшие расчёты грозовых перенапряжений выполним с подключённым ОПН-2 (вблизи силового трансформатора).

Моделирование грозовых перенапряжений с использованием 3D-моделей ВЛ и подстанции выявили новый (по сравнению с ЕМТР-моделями) фактор — волновые процессы на подстанции, вызванные обратным перекрытием изоляции опор ВЛ, начинаются при ненулевых начальных условиях. Причиной является ток молнии, протекающий по грозозащитному тросу. Через порталы он попадает в заземлитель подстанции, вызывая подъём потенциала. В результате в момент прихода волны перенапряжения, которая при пере-

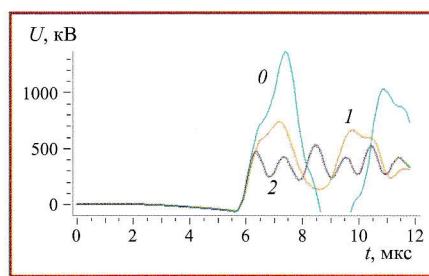


Рис. 4. Напряжение силового трансформатора (относительно заземлителя), вызванное ударом молнии в вершину опоры ВЛ (рис. 1) с перекрытием изоляции:

0 — без ОПН, 1 — с ОПН-1 (у портала), 2 — с ОПН-2 (вблизи силового трансформатора)

крытии изоляции опоры возникает с запаздыванием (рис. 3), начальное напряжение на ёмкости электрооборудования отрицательное (потенциал

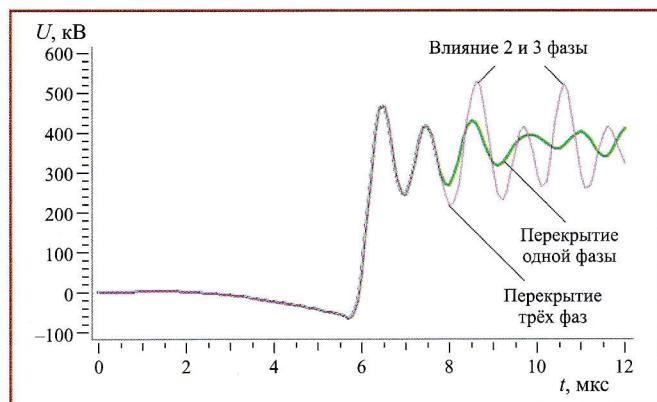


Рис. 5. Напряжение силового трансформатора при обратном перекрытии изоляции одной и трёх фаз воздушной линии

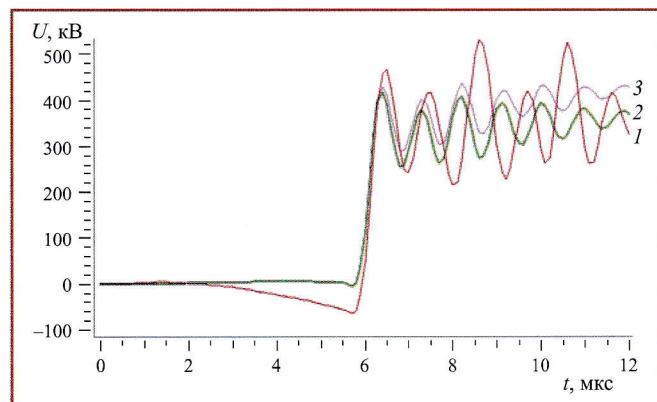


Рис. 6. Напряжение силового трансформатора, вызванное ударом молнии в вершину опоры ВЛ (рис. 1) с перекрытием изоляции, при использовании:

1 — 3D-модели заземлителя подстанции; 2 — заземлителя с $R = 0$ Ом; 3 — заземлителя с $R = 6$ Ом

шины подстанции меньше потенциала заземлителя). На эту величину снижается первый максимум напряжения после срабатывания ОПН первой фазы. Перенапряжение определяется вторым максимумом, который вызван колебательными процессами при срабатывании ОПН второй и третьей фазы (рис. 5).

Такие эффекты, моделируемые в высокомоментных грунтах, не возникают в ЕМТР-моделях, где заземлители (сосредоточенные сопротивления) не имеют взаимных связей, а ёмкости электрооборудования не связаны с заземлителем.

Приведём количественную оценку влияния заземлителя подстанции на волновые процессы в шинах. Для этого «отключим» 3D-заземлитель подстанции, а порталы и ОПН соединим с «удалённой землей» через активное сопротивление R (как в программе ЕМТР). Рассмотрим вариант $R = 0$ (идеальный заземлитель) и $R = 6$ Ом (сопротивление заземлителя подстанции на частоте 25 кГц). Ёмкости электрооборудования вместо заземлителя подключим к «удалённой земле».

При использовании ЕМТР-модели заземлителя грозовое перенапряжение определяется первым максимумом (рис. 6), далее колебания всегда затухают (вследствие потерь в земле, проводах, на корону, отражение волн и т. д.). При использовании 3D-модели заземлителя уровень перенапряжения на 20 % выше и определяется вторым максимумом при условии перекрытия двух или трёх фаз (рис. 6).

Сопоставляя графики 2 и 3 с графиком 1 (рис. 6) видно, что при упрощенном моделировании заземлитель подстанции следует описывать статическим, а не импульсным сопротивлением, чтобы получить корректную величину остающегося напряжения ОПН.

Выводы

Моделирование грозовых перенапряжений ВЛ и электрических подстанций с помощью программы ЕМТР предполагает упрощённую замену

сложной 3D-системы проводников в воздухе и земле цепной схемой замещения, где заземлители представлены сосредоточенными сопротивлениями. Рассматривая проводник в воздухе частным случаем проводника в земле, представлен альтернативный подход к 3D-моделированию грозовых перенапряжений на основе теории заземлителей в более точной постановке. Установлено, что заземлители подстанции усиливают колебательные процессы и уровни перенапряжений электрооборудования при обратных перекрытиях изоляции опор ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий / Б. В. Ефимов, Ф. Х. Халилов, А. Н. Новикова и др. // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2012. № 8. С. 7 – 25.
2. Математическое моделирование заземляющих устройств при действии импульсных токов / В. Н. Боронин, Н. В. Коровкин, С. И. Кривошеев и др. // Изв. Рос. акад. наук. Серия «Энергетика». 2013. № 6. С. 80 – 89.
3. Шишигин С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16 – 23.
4. Коровкин Н. В., Шишигин С. Л. Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1. С. 74 – 79.
5. Шишигин Д. С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики // Автоматизация в промышленности. 2014. № 9. С. 28 – 32.
6. Шишигин Д. С., Шишигин С. Л. Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 75–84.
7. РД 153-34.3-35.125—99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. Н. Н. Тихофеева. — СПб.: Изд. ПЭИПК, 1999. — 227 с.
8. Техника высоких напряжений / Г. Н. Александров и др.; под ред. М. В. Констанко. — М.: Высшая школа, 1973. — 528 с.

подстанции; одна или более кабельные вставки на протяжении ВЛ и полностью кабельные линии между подстанциями. В последние годы при строительстве ЛЭП 35, 110 и 220 кВ всё чаще проектируют кабели подземной прокладки с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В статье рассматривается трёхфазная система, состоящая из трёх отдельных высоковольтных кабелей.

Интересен и важен вопрос организации каналов высокочастотной (ВЧ) связи по кабельным (КЛ) и кабельно-воздушным линиям (КВЛ) электропередачи. Наличие кабельных вставок оказывает существенное влияние на характеристики ВЧ-тракта — появляются значительные неравномерности частотных характеристик и затухания несогласованности.

Недостатком заземления экранов кабелей с двух сторон является потеря электрической энергии из-за протекания в них токов промышленной частоты. При использовании кабелей из СПЭ для уменьшения потерь применяют различные способы предотвращения протекания токов промышленной частоты: заземление экранов с одной стороны или транспозиции экранов. Важно, что в регламентирующих документах, таких как стандарты ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-33.060.40.045–2010 [1], СТО 56947007-00.060.40.052–2010 [2] и международного стандарта МЭК 62488-1 [3] вопросы организации ВЧ-трактов по КЛ и КВЛ с транспозициями экранов или заземлением их с одной стороны не рассматриваются. В открытых литературных источниках информация по этим вопросам практически не освещена.

Особенности подключения к кабельным линиям

При подключении ВЧ-аппаратуры к КЛ используют стандартный высокочастотный заградитель (ВЧЗ) и конденсатор связи (КС), применяемые для подключения к ВЛ. При этом на КЛ можно использовать ВЧЗ с активной составляющей сопротивления блокировки меньшей, чем на ВЛ, так как волновое сопротивление КЛ 35 кВ и выше составляет 15 ... 50 Ом, а ВЛ — 240 ... 450 Ом. Отличие волнового сопротивления КЛ от ВЛ обуславливает то, что при подключении к КЛ нельзя использовать стандартные фильтры присоединения (ФП), предназначенные для ВЛ. Стандартный ФП со стороны ВЧ-оборудования имеет сопротивление 75 Ом, со стороны ВЛ — 240 ... 450 Ом в зависимости от класса напряжения ВЛ.

Применение стандартных ФП при подключении к КЛ повлечёт за собой увеличение затухания ВЧ-тракта, низкое затухание несогласованности и появление стоячих волн ВЧ-сигнала в КЛ, которые приведут к большой неравномерности частотных характеристик затухания и группового времени запаздывания. При низком затухании несогласованности ВЧ-тракта усилители мощности

Особенности организации высокочастотных каналов связи по кабельным и кабельно-воздушным линиям электропередачи

ХАРЛАМОВ В. А., канд. техн. наук, ООО «Юнител Инжиниринг»
111024, Москва, 2-я Кабельная улица, д. 2, стр. 1

ШКАРИН Ю. П., канд. техн. наук, АО «Институт «Энергосетьпроект»

РОМАНОВ С. Е., ООО «Юнител Инжиниринг», Москва, Россия

МЕРКУЛОВ А. Г., канд. техн. наук, ТОО «Сименс», Алматы, Казахстан

anton.merkulov@siemens.com



В. А. Харламов



Ю. П. Шкарин



С. Е. Романов



А. Г. Меркулов

Обсуждаются особенности организации высокочастотных каналов по кабельным и кабельно-воздушным линиям электропередачи. Показано, какими модальными параметрами характеризуются кабельные линии, как влияют кабельные вставки на характеристики высокочастотного тракта. Рассмотрен наиболее сложный и интересный случай, когда используются транспозиции экранов кабелей.

Ключевые слова: ВЧ-связь, высоковольтные кабели подземной прокладки, транспозиция экранов, затухание, модальные составляющие.

Маслонаполненные кабели низкого и высокого давления используются при строительстве высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 35 и 110 кВ уже довольно давно. Можно выделить три основных вариан-

та применения высоковольтных кабелей, когда по каким-либо причинам, в основном связанным с инфраструктурными ограничениями, сооружение полностью воздушных линий (ВЛ) невозможно: заходы воздушных ЛЭП на