

Авторы:
к.т.н. Шкарин Ю.П.,
АО «Институт
«Энергосетьпроект»,
г. Москва, Россия,
к.т.н. Харламов В.А.,
ООО «Юнител
Инжиниринг»,
г. Москва, Россия.

Ph.D. Shkarin Y.A.,
JSC Institut
EnergoSetProject,
Moscow, Russia,
Ph.D. Kharlamov V.A.,
Unitel Engineering LLC,
Moscow, Russia.

Ключевые слова: высокочастотный тракт, воздушная линия электропередачи, входное сопротивление, затухание несогласованности, фильтр присоединения.

Abstract: this paper discusses the input impedance and the return loss of the high frequency paths along overhead power lines. The factors influencing these parameters are given. The features of their frequency characteristics for high frequency paths with high and low line attenuation are shown.

Keywords: high frequency path, overhead power line, input impedance, return loss, coupling device.

ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ НЕСОГЛАСОВАННОСТИ ВЧ ТРАКТОВ ПО ВОЗДУШНЫМ ЛЭП

INPUT IMPEDANCE AND RETURN LOSS OF THE HF PATHS ALONG OVERHEAD POWER LINES

Аннотация: в статье рассмотрены входное сопротивление и затухание несогласованности высокочастотных трактов по воздушным линиям электропередачи. Приведены влияющие на данные параметры факторы. Показаны особенности их частотных зависимостей в высокочастотных трактах с большим и малым рабочим затуханием.

Введение

Согласование входного сопротивления высокочастотного (ВЧ) тракта по линии электропередачи (ЛЭП) и сопротивления ВЧ окончания аппаратуры – одна из задач, которая должна решаться на всех этапах организации ВЧ каналов различного назначения: от разработки ВЧ аппаратуры и устройств ВЧ обработки и присоединения (УОП) до эксплуатации ВЧ каналов в энергопредприятиях. Но в настоящий момент имеется только одна статья [1], посвященная вопросу согласования ВЧ тракта и ВЧ аппаратуры, да и та делает акцент на применении высокоомного приемника и практически не касается общих сведений о возможных значениях входного сопротивления ВЧ трактов и об особенностях влияющих на него различных факторов. Цель данной статьи – попытка восполнить данный пробел.

Для определения степени отличия между сопротивлениями четырехполюсника и его нагрузки в виде двухполюсника используют затухание несогласованности $A_{НС}$. Затухание несогласованности определяется комплексным входным сопротивлением четырехполюсника Z_1 и комплексным сопротивлением его нагрузки Z_2 :

$$A_{НС} = 20 \cdot \lg \left(\frac{|Z_1 + Z_2|}{|Z_1 - Z_2|} \right). \quad (1)$$

При равенстве комплексных сопротивлений Z_1 и Z_2 (равны как модули $|Z_1|$ и $|Z_2|$, так и фазовые углы φ_1 и φ_2) затухание несогласованности $A_{НС}$ равно бесконечности, что соответствует полному согласованию. Чем больше отличаются сопротивления Z_1 и Z_2 , тем меньше затухание несогласованности и тем хуже согласование.

Затухание несогласованности нормируется отдельно для ВЧ аппаратуры и отдельно для ВЧ тракта. Это делает возможным независимую проверку выполнения данных норм в ВЧ аппаратуре и в ВЧ трактах. При этом в формуле (1) принимаются следующие значения Z_1 и Z_2 :

- для ВЧ аппаратуры: Z_1 – сопротивление ВЧ окончания аппаратуры в полосе частот передачи и/или приема, а Z_2 – номинальное значение этого сопротивления 75 Ом;
- для ВЧ тракта: Z_1 – входное сопротивление ВЧ тракта, а Z_2 – номинальное значение этого сопротивления 75 Ом.

Факторы, влияющие на входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта

На входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта, а также на характер их частотных зависимостей большое влияние оказывают особенности построения ВЧ тракта и распространения по нему ВЧ сигналов. Данные особенности связаны с тем, что электрическая сеть, состоящая из ЛЭП и подстанций (ПС), изначально

предназначена для передачи электроэнергии на промышленной частоте. Организация ВЧ каналов по ЛЭП может быть решена лишь их приспособлением в той или иной степени для передачи ВЧ сигналов.

Из всех факторов, определяющих входное сопротивление ВЧ тракта, наибольшее влияние оказывают:

- конструкция ЛЭП и наличие/отсутствие на ней ответвлений;
- используемые для организации ВЧ тракта специализированные УОП, в состав которых входят фильтры присоединения (ФП) с конденсаторами связи (КС) для подключения ВЧ аппаратуры к фазам воздушной линии (ВЛ) и высокочастотные заградители (ВЧЗ) для ограничения распространения ВЧ сигнала в сторону сборных шин ПС;
- изменяющиеся концевые условия фаз ВЛ, при которых они могут быть соединены с шинами ПС, отключены от шин ПС и изолированы, отключены от шин ПС и заземлены;
- невозможность полного исключения отраженных от концов ВЛ волн.

ВЧ параметры фильтров присоединения и высокочастотных заградителей

ФП вместе с КС, выполняющие функцию устройств присоединения (УП) к ВЛ, представляют собой несимметричный четырехполюсник (рис. 1), параметрами которого являются собственный (характеристический) коэффициент передачи $g=a+jb$ и характеристические сопротивления со стороны ВЧ кабеля Z_{C1} и со стороны линии Z_{C2} .

Требования к ВЧ параметрам ФП заключаются в том, что в пределах его полосы пропускания рабочее затухание не должно превышать 2 дБ, а затухание несогласованности со стороны ВЧ кабеля и со стороны ВЛ должно быть не менее 12 дБ. Эти требования должны выполняться при работе ФП с номинальными сопротивлениями нагрузки Z_1 со стороны ВЧ кабеля и Z_2 со стороны линии, как это показано на рис. 1.

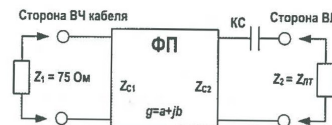


Рис. 1. Схемы нормирования параметров ФП

В соответствии с [2] номинальное сопротивление ФП с КС со стороны ВЧ кабеля Z_1 должно быть равно 75 Ом, и номинальное сопротивление ФП с КС со стороны ВЛ Z_2 должно быть равно значению, приведенному в табл. 1 (оно принимается равным характеристическому (номинальному) сопротивлению линейного тракта $Z_{ЛТ}$).

Таблица 1. Номинальные сопротивления ФП с КС со стороны ВЛ для схемы «фаза-земля»

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	35-220	330	500	750
Номинальное сопротивление ФП с КС со стороны линии, Ом	450	340	310	280

Основное требование к ВЧЗ: в пределах полосы заграждения ВЧЗ действительная часть его полного сопротивления должна быть не менее принятой нормы, которая определяется, как:

$$R_{ВЧЗ} = 1,43 \cdot Z_{ЛТ}. \quad (2)$$

Выполнение данного требования приводит к тому, что максимально возможное затухание, вносимое ВЧЗ в ВЧ тракт с характеристическим сопротивлением $Z_{ЛТ}$, не будет превышать 2,6 дБ при любом входном сопротивлении «отсекаемых» им шин ПС вместе с подключенной к ним электрической сетью.

Следует отметить, что условия, при которых нормируются параметры УОП, могут существенно отличаться от реальных, когда ФП и ВЧЗ установлены на ВЛ. Это должно быть учтено при проведении анализа входного сопротивления ВЧ тракта.

Режимы ВЛ и концевые условия для фаз ВЛ

ВЧ канал должен работать с требуемыми параметрами как при включенном, так и при отключенном состоянии ВЛ.

На рис. 2 приведена упрощенная схема подключения ВЛ к шинам ПС и показано

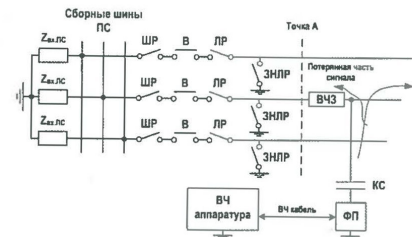


Рис. 2. Упрощенная схема подключения ВЛ к шинам ПС



Шкарин Юрий Павлович

В 1956 г. окончил Всесоюзный Заочный Политехнический Институт (ВЗПИ). В 1967 г. в Институте электромеханики АН СССР защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование характеристик высокочастотных трактов по линиям высокого напряжения». Лауреат премии им. П.Н. Яблочкова АН СССР (1979 г.). Ведущий специалист АО «Институт «Энергосетьпроект».



Харламов Василий Анатольевич

В 1995 г. окончил Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра радиотехнических систем. В 2000 г. защитил в Московском энергетическом институте кандидатскую диссертацию на тему «Методы увеличения скорости передачи информации в синхронных тональных каналах связи в распределительных электрических сетях среднего и низкого напряжения». Заместитель технического директора ООО «Юнител Инжиниринг».



коммутационное оборудование, с помощью которого производится включение/отключение и, при необходимости, заземление ВЛ. Также на рис. 2 показано подключение ВЧ аппаратуры к ВЛ с использованием КС, ФП и ВЧЗ.

Коммутационное оборудование, с помощью которого устанавливаются режимы ВЛ, это линейный разъединитель (ЛР), заземляющий нож линейного разъединителя (ЗНРЛ), выключатель (В) и, наконец, шинный разъединитель (ШР). Само включение/отключение ВЛ производится только выключателем В, который снабжен устройством гашения дуги, возникающей при разрыве тока нагрузки и тока короткого замыкания (КЗ). Включение/отключение ЛР и ШР производят только при выключенном состоянии выключателя В. Отключение разъединителей необходимо в том числе для обеспечения видимых глазом разрывов цепи подключения ВЛ к шинам ПС. ЗНРЛ включают для заземления фаз по концам отключенной ВЛ. ЗНРЛ может находиться во включенном состоянии только при отключенном состоянии ЛР.

Имеются три варианта конечных условий, в которых могут находиться фазы ВЛ на каждом из ее концов (точка А на рис. 3):

- ВЛ включена на сборные шины ПС: ЛР, выключатель В и ШР включены, а ЗНРЛ отключен. Данный режим является рабочим;
 - ВЛ отключена и не заземлена: оборудование во включенном состоянии отсутствует, т.е. ЛР, выключатель В, ШР и ЗНРЛ отключены, хотя выключатель В после отключения ЛР и ШР может быть и включен. Данный режим является режимом холостого хода (ХХ);
 - ВЛ отключена и заземлена: ЗНРЛ включен, а ЛР, выключатель В и ШР отключены. Данный режим является режимом КЗ.
- В каждом из этих режимов условия согласования ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта отличаются.

Входное сопротивление ПС

В схемах распределительных устройств ПС (в схемах первичной коммутации ПС) используются следующие виды оборудования:

- коммутационное оборудование: выключатели и разъединители;
- измерительное оборудование: трансформаторы тока (ТТ) и трансформаторы напряжения (ТН);
- защитное оборудование: разрядники или ограничители перенапряжений (ОПН);
- силовое оборудование: силовые трансформаторы (автотрансформаторы) и реакторы.

Все это оборудование соединяется между собой в необходимой последовательности проводами сборных шин. К сборным шинам подключаются ЛЭП, соединяющие эту ПС с электрической сетью.

Для представления о том, что понимается под термином «входное сопротивление подстанции», обра-

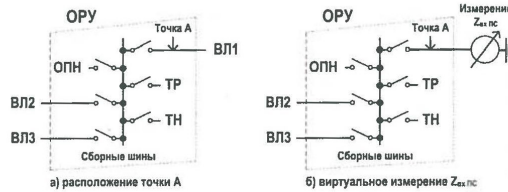


Рис. 3. К определению входного сопротивления подстанции

тимся к рис. 3, на котором дано эскизное изображение (в однолинейном виде) сборных шин ПС с указанием названий присоединенных к ним объектов.

На рис. 3 к сборным шинам ПС подключены три ВЛ (в том числе и «наша» ВЛ1 с указанием на этой ВЛ места расположения точки А, указанной ранее на рис. 2), силовой трансформатор (ТР), измерительный ТН и ОПН. Коммутационное оборудование, имеющееся в цепи каждого из присоединенных к сборным шинам объектов, обозначено на рисунке условно в виде значка $\circ \circ$, который показывает лишь наличие оборудования без учета числа и типа этого оборудования.

Входное сопротивление ПС определяется как входное сопротивление всей сети, которая расположена за точкой А (если смотреть в сторону сборных шин ПС), показанной на рис. 2 и 3а. Входное сопротивление ПС определяется в диапазоне частот, используемом для ВЧ каналов.

Определение входного сопротивления ПС можно представить себе из рассмотрения рис. 3б, на котором приведена схема его виртуального измерения, если бы такое подключение измерительного прибора было бы возможно.

Рассмотрим сначала определение эквивалентной схемы замещения каждого из объектов, которые могут входить в схему первичной коммутации ПС, в используемом для организации ВЧ каналов диапазоне частот.

Для всех перечисленных выше видов оборудования, за исключением ВЛ, эквивалентная схема замещения представляет собой конденсатор с емкостью, значение которой зависит от вида этого оборудования и его конкретного типа. Такая же схема замещения используется и при расчетах импульсных перенапряжений, спектр которых лежит в том же диапазоне частот, в которой работают ВЧ каналы.

Значения емкостей конденсаторов эквивалентной схемы замещения упомянутых видов оборудования приведены в [3 - 5]. Эти данные получены экспериментально измерениями входного сопротивления оборудования разного назначения и типа. Несмотря на то, что со времени выхода публикаций [3 - 5] номенклатура изделий довольно сильно изменилась, приведенные в них данные могут быть использованы для оценки величины входного сопротивления ПС. При этом значения емкости надо принимать не по заводскому наименова-



нию оборудования, а по его назначению и номинальному напряжению, а для силовых трансформаторов еще и по их номинальной мощности.

ВЛ в эквивалентной схеме замещения представляется ее входным сопротивлением. Значение этого сопротивления зависит от многих факторов и может быть определено расчетом в соответствующих программах с использованием модальной теории. Однако, для упрощения задачи входное сопротивление ВЛ представляется характеристическим сопротивлением линейного тракта с допущением, что в ВЛ на противоположном ее конце полностью согласована и от него нет отраженных волн.

Как правило, входное сопротивление ПС определяется при пренебрежении волновыми процессами. Это обусловлено тем, что:

- волновые процессы будут существенно демпфированы потерями в ВЛ, отходящих от сборных шин, и результаты расчета с учетом и без учета волновых процессов не будут кардинально отличаться;
- методика расчета волновых процессов в сборных шинах, имеющих сложную геометрическую структуру, крайне сложна.

В этом случае входное сопротивление ПС определяется в эквивалентной схеме, представляющей собой параллельно включенные (см. [5]):

- суммарную емкость оборудования ПС $C_{ПС}$ (включая емкость самих сборных шин длиной $L_{шины}$):

$$C_{ПС} = 7,5 \cdot L_{шины} + \sum_i C_i \quad (3)$$

Суммирование в (3) производится для оборудования, подключенного к сборным шинам, за исключением ВЛ;

- входное сопротивление всех ВЛ, подходящих к ПС за исключением одной:

$$R_{ВЛ\ сумм} = \frac{Z_{ЛТ}}{k-1} \quad (4)$$

где $Z_{ЛТ}$ – характеристическое сопротивление линейного тракта, определяемого по табл. 1;

k – общее число ВЛ, подходящих к рассматриваемому открытому распределительному устройству (ОРУ).

По значениям $C_{ПС}$ и $R_{ВЛ\ сумм}$, определенных по (3) и (4), входное сопротивление ПС $Z_{ПС}$ определяется как:

$$Z_{ПС} = \frac{R_{ВЛ\ сумм}}{1 + (2\pi f C_{ПС} R_{ВЛ\ сумм})^2} - j \frac{1}{2\pi f C_{ПС} \left(1 + \frac{1}{(2\pi f C_{ПС} R_{ВЛ\ сумм})^2} \right)} \quad (5)$$

Для тупиковых ПС 35-110 кВ (к которым подходит только одна ВЛ), имеющих небольшое ОРУ с малой длиной сборных шин, допущение об отсутствии волновых

процессов в сборных шинах не приводит к заметным погрешностям расчета $Z_{ПС}$.

Для этих ПС входное сопротивление можно приближенно определять по формуле:

$$Z_{ПС} \approx -j \frac{1}{2\pi f C_{ПС}} \quad (6)$$

в которой $C_{ПС}$ определяется по (3).

Расчеты показывают, что для тупиковой ПС 35-110 кВ с одним силовым трансформатором эквивалентная емкость ПС может быть принята равной 3000 пФ.

Следует отметить, что формула (5), полученная при допущении отсутствия волновых процессов, подразумевает, что входное сопротивление ПС одинаково для всех ВЛ, подходящих к ОРУ. Если к ПС подключено две и более ВЛ и длина сборных шин между наиболее удаленными ячейками ОРУ превышает величину, при которой на частоте 1000 кГц можно пренебречь волновыми процессами, то входное сопротивление ПС, определенное для одной из ВЛ, для другой ВЛ может быть другим.

Упрощенный анализ влияния режимов ВЛ на входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта

Рассмотрим влияние режима ВЛ (вариантов конечных условий фаз ВЛ) на величину затухания несогласованности ВЧ тракта, используя упрощенные модели со следующими допущениями:

- ВЛ на противоположном ее конце полностью согласована и от него нет отраженных волн ВЧ сигнала;
- не учитывается влияние конечных условий нерабочих фаз (изменение характеристического сопротивления ВЧ тракта при изменении конечных условий на нерабочих фазах невелико).

Эквивалентные упрощенные модели ВЧ тракта приведены на рис. 4.

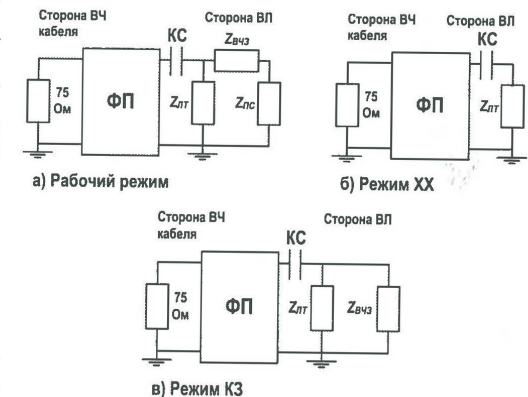


Рис. 4. Схемы для анализа согласования ВЧ тракта на одной из его сторон



На рис. 4 согласно принятым выше допущениям:

- ВЛ заменена характеристическим сопротивлением линейного тракта;
- в модели учитываются только цепи, связанные с рабочей фазой.

Следует отметить, что схема для режима ХХ на рис. 4 полностью совпадает со схемой нормирования параметров ФП на рис. 1. Таким образом, при отключенной и не заземленной на рассматриваемом конце ВЛ, затухание несогласованности ВЧ тракта равно затуханию несогласованности ФП, используемого для организации ВЧ тракта, и в любом случае будет не менее нормируемых 12 дБ.

В режиме КЗ ФП нагружен со стороны ВЛ на сопротивление $Z_{2КЗ}$ параллельно соединенных характеристического сопротивления линейного тракта и сопротивления ВЧЗ:

$$Z_{2КЗ} = \frac{Z_{ЛТ} Z_{ВЧЗ}}{Z_{ЛТ} + Z_{ВЧЗ}} \quad (7)$$

Это сопротивление всегда будет меньше характеристического сопротивления линейного тракта $Z_{ЛТ}$, при котором производится нормирование затухания несогласованности ФП. То есть в режиме КЗ затухание несогласованности ВЧ тракта всегда будет меньше нормируемого для ФП значения 12 дБ.

Будем считать, что сопротивление ВЧЗ равно принятой норме, определяемой по формуле (2). Подставив формулу (2) в формулу (7) можно получить:

$$Z_{2КЗ} = 0,588 \cdot Z_{ЛТ} \quad (8)$$

Для того чтобы увидеть, как режим ВЛ влияет на входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта, произведем их расчет на примере ВЛ 35-220 кВ с использованием упрощенных моделей:

- режим ХХ, в котором нагрузка равна характеристическому сопротивлению линейного тракта ($Z_{2ХХ} = 450 \text{ Ом}$);
- режим КЗ, в котором нагрузка определяется по формуле (8), что соответствует параллельному вклю-

чению характеристического сопротивления линейного тракта 450 Ом и сопротивления блокировки ВЧЗ 644 Ом ($Z_{2КЗ} = 265 \text{ Ом}$);

- рабочий режим, в котором нагрузка представляет собой параллельное включение характеристического сопротивления линейного тракта 450 Ом и сопротивления блокировки ВЧЗ 644 Ом с емкостью 3000 пФ, представляющей входное сопротивление тупиковой ПС 110 кВ.

Произведем сначала расчет с использованием идеального УП для ВЛ 35-220 кВ, в котором:

- рабочий диапазон частот не ограничен;
- вносимое затухание 0 дБ;
- сопротивление со стороны ВЛ при нагрузке 75 Ом со стороны ВЧ кабеля 450 Ом.

Данное идеальное УП представляет собой индуктивный трансформатор без потерь с коэффициентом трансформации $\sqrt{450/75}$. Очевидно, что с идеальным УП в режиме ХХ входное сопротивление ВЧ тракта чисто активное и равно 75 Ом, а затухание несогласованности, определенное по формуле (1), равно бесконечности. В режиме КЗ входное сопротивление ВЧ тракта также чисто активное и равно 44 Ом, а затухание несогласованности – 11,7 дБ. Результаты расчета для рабочего режима приведены на рис. 5.

Из результатов расчетов можно сказать, что в рабочем режиме и представлении тупиковой ПС 110 кВ эквивалентной емкостью 3000 пФ, затухание несогласованности ВЧ тракта будет не меньше, чем в режиме КЗ. Превышение этого затухания над затуханием в режиме КЗ зависит от частоты и величины эквивалентной емкости ПС. Чем выше частота, и/или эквивалентная емкость ПС, тем меньше входное сопротивление ПС, и тем меньше отличается затухание несогласованности в рабочем режиме от режима КЗ. Увеличение объема обороту в сборных шинах приводит к увеличению эквивалентной емкости ПС, что уменьшает ее входное сопротивление. То же самое можно сказать для ПС с большим числом подходящих ВЛ, так как подходящие ВЛ уменьшают входное сопротивление ПС по сравнению с тупиковой ПС.

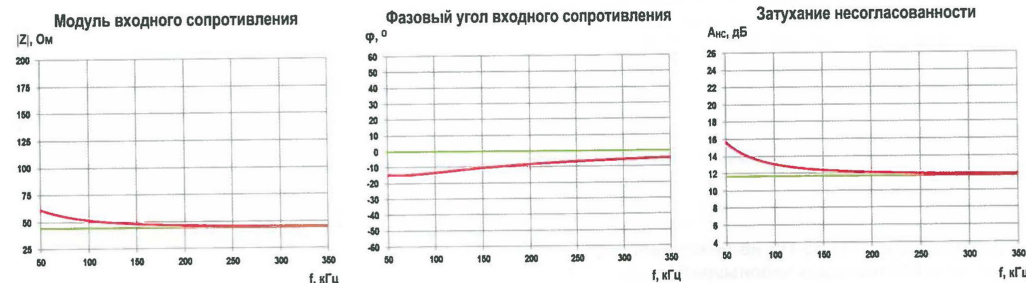


Рис. 5. Результаты расчета с идеальным УП для упрощенной модели: красная линия – рабочий режим; зеленая линия – режим КЗ

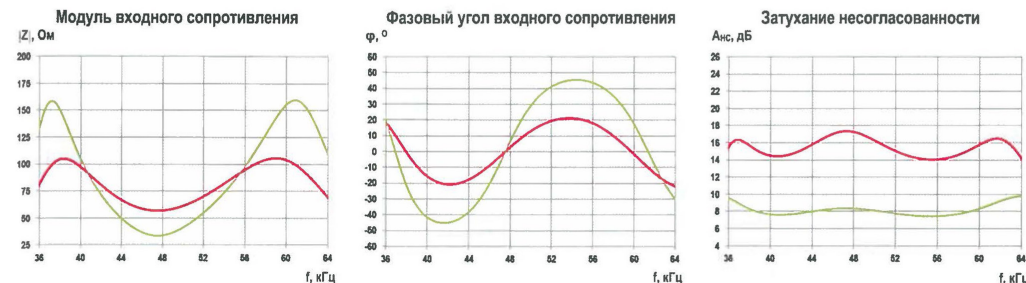


Рис. 6. Результаты расчетов с реальными ФП и КС для упрощенной модели: красная линия – режим ХХ; зеленая линия – КЗ

На рис. 6 представлены результаты расчета в режимах ХХ и КЗ для реального ФП и КС 3200 пФ с рабочими частотами 36-63 кГц для ВЛ 220 кВ без учета ВЧ кабеля.

Как и следовало ожидать, с реальными ФП и КС значение затухания несогласованности ВЧ тракта в режиме КЗ значительно меньше его значения в режиме ХХ. При этом по сравнению с идеальным УП затухание несогласованности уменьшается с бесконечности до 14 дБ в режиме ХХ, что обеспечивает хорошее согласование, и с 11,7 дБ до 7,5 дБ в режиме КЗ, что вносит существенное рассогласование. По сравнению с идеальным УП во входном сопротивлении ВЧ тракта появляется большая реактивная составляющая. Вследствие этого, несмотря на то, что на некоторых частотах модуль входного сопротивления равен 75 Ом, затухание несогласованности на данных частотах далеко не бесконечно. Также следует отметить, что в режиме КЗ значение фазового угла больше (около 45°), чем в режиме ХХ (около 20°), т.е. рассогласование со стороны ВЛ приводит к увеличению реактивной составляющей. При этом минимальные значения затухания несогласованности в режимах ХХ и КЗ расположены в тех областях частот, где абсолютные величины фазового угла входного сопротивления максимальны. Похожие результаты могут быть получены для всех ФП, предназначенных для ЛЭП различных классов напряжения, выполненных по схеме полосового фильтра.

При этом чем больше затухание несогласованности реального ФП будет превышать норму 12 дБ и/или заграждающее сопротивление используемого ВЧЗ будет больше нормы, определенной по формуле (2), то тем больше будет затухание несогласованности ВЧ тракта.

Точный анализ влияния режимов ВЛ на входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта

Далее приведен анализ входного сопротивления и затухания несогласованности ВЧ тракта без указанных ранее упрощающих допущений. Вводится только одно ограничение для получения наиболее наглядной картины: в схему ВЧ тракта входит только одна ВЛ

без ответвлений, а ВЧ тракт организован по оптимальной схеме присоединения. Используется тот же реальный ФП для ВЛ 220 кВ, с которым проведены расчеты в упрощенной модели. Как показано ранее, режим КЗ близок по своим параметрам к рабочему режиму, поэтому анализ проводится в режимах ХХ и КЗ на обоих концах ВЛ.

При сопоставлении результатов расчетов с и без указанных ранее упрощений надо иметь в виду, что условия расчета для этих двух случаев не совсем одинаковы. При расчетах с упрощениями использовалось номинальное значение характеристического сопротивления линейного тракта по ВЛ 35-220 кВ, равное 450 Ом. При дальнейших расчетах это сопротивление для рассматриваемой ВЛ определяется с учетом ее конструкции. Таким образом, при дальнейших расчетах ВЧ тракта характеристическое сопротивление линейного тракта отличается от используемого ранее номинального значения 450 Ом.

Анализ производится отдельно для двух основных групп ВЧ трактов, разделенных по критерию влияния на их параметры отраженными волн. При этом ФП на противоположном конце ВЛ нагружен на сопротивление 75 Ом.

ВЧ тракты первой группы

К первой группе ВЧ трактов отнесем ВЧ тракты, у которых волна, отраженная от противоположного конца ВЛ, практически полностью затухает на протяжении ВЛ, а ее наличием в точке, в которой производится расчет входного сопротивления ВЧ тракта, можно пренебречь. У таких ВЧ трактов все параметры при изменении частоты изменяются достаточно плавно. Области повышенного рабочего затухания, которые могут быть в данных ВЧ трактах, появляются вследствие взаимодействия падающих волн разных модальных составляющих и не обусловлены отраженными волнами. Как правило, к первой группе относятся тракты по длинным транспонированным линиям напряжением 220 кВ и выше.

Критерием принадлежности ВЧ тракта к этой группе можно считать величину затухания междуфазной

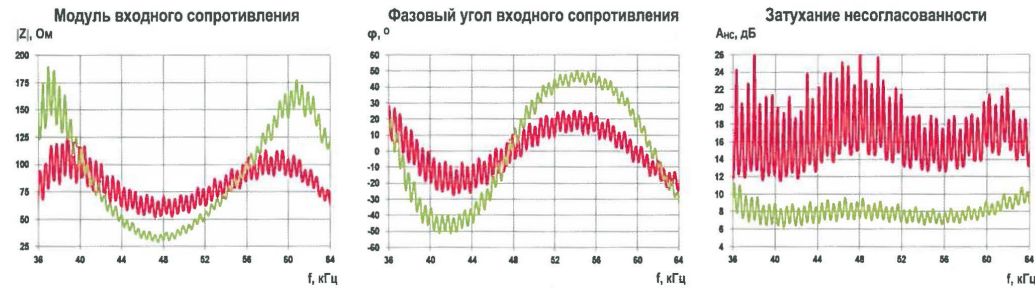


Рис. 7. Результаты расчетов без упрощающих допущений ВЧ тракта 1-ой группы: красная линия – режим XX; зеленая линия – режим К3

волны на длине ВЛ. В первом приближении может быть принято, что величина этого затухания должна быть не менее 15 дБ.

В качестве примера рассмотрим ВЧ тракт по ВЛ 220 кВ длиной 270 км с горизонтальным расположением фаз и стандартной схемой их транспозиции. На рис. 7 приведены результаты расчетов для указанного ВЧ тракта.

Как видно из рис. 6 и 7, имеется хорошее совпадение частотных зависимостей модулей и фазового угла входного сопротивления и затухания несогласованности, рассчитанных для ВЧ тракта 1-ой группы с и без упрощающих допущений. Имеются не критичные и периодически повторяющиеся отклонения величин, рассчитанных без упрощающих допущений, от их значений в упрощенной модели. Данные отклонения связаны с наличием отраженных от противоположного конца ВЛ волн небольшого уровня. То есть, использование упрощенной модели для расчета входного сопротивления и затухания несогласованности ВЧ тракта 1-ой группы вполне допустимо. Следует отметить, что с ростом частоты ВЧ сигнала «размах» отклонений входного сопротивления, рассчитанного без упрощающих допущений, от его упрощенной модели уменьшается. Это связано с ростом затухания междуфазной волны при увеличении частоты ВЧ сигнала, которое приводит

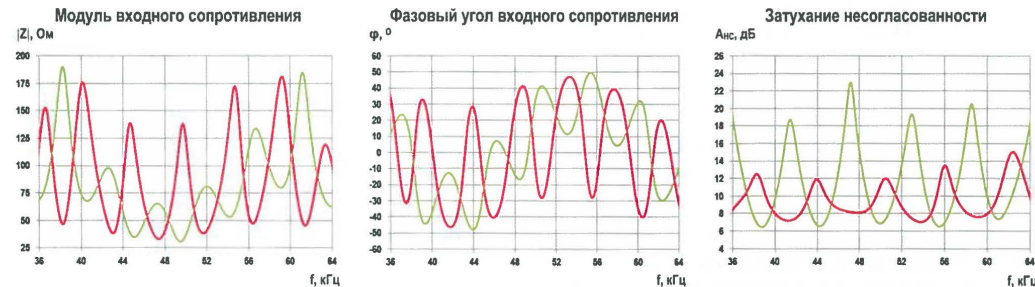


Рис. 8. Результаты расчетов без упрощающих допущений ВЧ тракта 2-ой группы: красная линия – режим XX; зеленая линия – режим К3



струкцией, что была использована для расчетов ВЧ тракта 1-ой группы. На рис. 8 приведены результаты расчета для указанного ВЧ тракта.

Как видно из рис. 6 и 8, частотные зависимости модуля и фазового угла входного сопротивления и затухания несогласованности существенно отличаются при расчетах с и без упрощающих допущений. Крайне существенные и периодически повторяющиеся отклонения величин, рассчитанных без упрощающих допущений, от их значений в упрощенной модели связаны с наличием отраженных от противоположного конца ВЛ волн большого уровня. Таким образом, использование упрощенной модели для анализа частотных зависимостей входного сопротивления и затухания несогласованности ВЧ тракта 2-ой группы недопустимо. В отличие от ВЧ трактов 1-ой группы согласование может быть неприемлемым как в режиме XX, так и в режиме К3. Кроме того, следует отметить, что низкое затухание несогласованности в режиме XX говорит о том, что реальное характеристическое сопротивление ВЛ отличается от входного сопротивления ФП, что приводит к возникновению существенных отраженных волн.

Также следует отметить, что на ряде частот затухание несогласованности в режиме К3, который близок к рабочему режиму, может быть высоким (более 12 дБ), а в режиме XX уменьшаться практически до 6 дБ, и наоборот. Кроме того, в стандартной полосе ВЧ канала 4 кГц модуль входного сопротивления может меняться на величину более 125 Ом, а затухание несогласованности на величину более 15 дБ (т.е. на одних частотах в полосе ВЧ канала 4 кГц согласование может быть хорошим, а на других – неприемлемым). В полосе канала ВЧ защит 2 кГц данные изменения могут составлять более 75 Ом и более 7 дБ соответственно. Это необходимо учитывать при проектировании, наладке и эксплуатации ВЧ каналов по ВЧ тактам 2-ой группы.

Выводы

Коммутационное состояние ВЛ оказывает значительно большее влияние на входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта, чем сопротивление ПС. Поэтому их расчеты и измерения необходимо проводить в двух коммутационных режимах ВЛ: XX и К3. Причем режим К3 близок к рабочему режиму, когда ВЛ подключена к шинам ПС.

Входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ тракта зависит от используемых ФП, и это должно учитываться при проектировании ВЧ трактов.

ВЧ тракты можно разбить на две группы: 1-я группа – ВЧ тракты по длинным ВЛ с большим затуханием междуфазной волны и 2-я группа – ВЧ тракты по коротким ВЛ с малым затуханием междуфазной волны. В ВЧ трактах 1-ой группы изменение входного сопротивления и затухания несогласованности в полосах каналов 2 и 4 кГц незначительно, а в ВЧ трактах 2-ой группы

довольно существенное. Это должно учитываться при разработке ВЧ аппаратуры, а также при проектировании, наладке и эксплуатации ВЧ каналов различного назначения.

Литература:

1. Шарин Ю.П. О возможности использования аппаратуры с рассогласованным приемником в каналах ВЧ связи по ВЛ // Энергетик. – 2006. - №9.
2. СТО 56947007-33 060 40 125-2012 Общие технические требования к устройствам обработки и присоединения каналов ВЧ связи по ВЛ 35-750 кВ.
3. Журавская Г.Я. ВЧ параметры трансформаторов МТЗ. В кн.: Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып. 22. - М.: Энергия, 1960.
4. Журавская Г.Я. ВЧ параметры высоковольтного измерительного, коммутационного и защитного оборудования подстанций 35, 110 и 220 кВ. В кн.: Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып. 24. - М.: Энергия, 1960.
5. Незаметдинова Н.М., Шарин Ю.П. Измерения параметров подстанций 500 кВ. В кн.: Вопросы эксплуатации устройств связи в энергосистемах. Вып. 7. - М.: Энергия, 1965. ☒