



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

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

# СОГЛАСОВАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКА ВЧ АППАРАТУРЫ И ВЧ ТРАКТОВ ПО ВОЗДУШНЫМ ЛЭП

## MATCHING THE PLC EQUIPMENT TRANSMITTER AND HF PATHS ALONG OVERHEAD POWER LINES

**Аннотация:** в статье рассмотрено согласование передатчика высокочастотной аппаратуры и высокочастотных трактов по воздушным линиям электропередачи. Приведены способы улучшения данного согласования и проведена оценка их эффективности.

**Ключевые слова:** высокочастотный тракт, высокочастотная аппаратура, воздушная линия электропередачи, входное сопротивление, затухание несогласованности, фильтр присоединения, согласующий трансформатор, аттенюатор

**Abstract:** this paper discusses the matching of the power line carrier equipment transmitter and high frequency paths along overhead power lines. The ways to improve this matching are given, and their effectiveness is evaluated.

**Keywords:** high frequency path, power line carrier equipment, overhead power line, input impedance, return loss, coupling device, matching transformer, attenuator.

### Введение

Отсутствие необходимой степени согласования передатчика высокочастотной (ВЧ) аппаратуры и ВЧ тракта может приводить к возникновению проблем в работе ВЧ каналов различного назначения. Как показано в [1], основной причиной данного рас согласования является существенное отличие входного сопротивления ВЧ тракта, имеющего сложный характер частотной зависимости, от его номинального значения 75 Ом. Происходит это из-за особенностей параметров устройств обработки и присоединения, изменяющихся режимов работы воздушной линии электропередачи (ВЛ) и наличия отраженных волн ВЧ сигнала. При этом доля мнимой составляющей во входном сопротивлении ВЧ тракта может быть довольно большой.

По распространенному среди специалистов в области ВЧ связи мнению, при рас согласовании передатчика ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта могут наблюдаться следующие нежелательные явления:

- увеличение нелинейных искажений в передатчике ВЧ аппаратуры по двум причинам:

- при сопротивлении нагрузки, отличающемся от номинального активного сопротивления 75 Ом, усилитель мощности (УМ) работает в неоптимальном режиме;

– при сопротивлении нагрузки существенно выше номинального значения напряжение усиливаемого сигнала может выходить за пределы, определяемые напряжением питания УМ.

Это может привести:

- к ухудшению работы организованных по ней ВЧ каналов за счет продуктов внутриволновых нелинейных искажений в передаваемом ВЧ сигнале;

- к отрицательному влиянию на работу приемников других ВЧ каналов за счет продуктов внеполосных нелинейных искажений (в том числе внести существенные помехи в принимаемый собственным приемником сигнал в дуплексной ВЧ аппаратуре при смежных частотах приема и передачи).

- повышенный нагрев ВЧ аппаратуры;
- изменение настройки линейного фильтра передатчика за счет мнимой составляющей входного сопротивления ВЧ тракта со всеми вытекающими последствиями, что особенно проявляется в одноконтурной схеме линейного фильтра;

- уменьшение выдаваемой в ВЧ тракт мощности сигнала из-за работы передатчика на сопротивление нагрузки, отличающееся от номинального значения (увеличение затухания вследствие отражения).

Указанные нежелательные явления по-разному проявляются у разных про-



изводителей ВЧ аппаратуры в зависимости от принятых ими схемотехнических решений. Цель данной статьи – проведение анализа мероприятий, которые можно провести для улучшения согласования ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта, и оценка их эффективности.

### Зависимость затухания несогласованности от входного сопротивления ВЧ тракта

Рассмотрим характер зависимости затухания несогласованности ВЧ тракта по отношению к его номинальному сопротивлению 75 Ом от входного сопротивления ВЧ тракта. Затухание несогласованности  $A_{HC}$  по отношению к 75 Ом определяется как:

$$A_{HC} = 20 \cdot \lg \left( \frac{|Z_1| + 75}{|Z_1| - 75} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{m+1}{m-1} \right) = \\ = 10 \cdot \lg \left( \frac{|m|^2 + 2|m|\cos\varphi + 1}{|m|^2 - 2|m|\cos\varphi + 1} \right), \quad (1)$$

$$m = \frac{Z_1}{75} = |m| e^{i\varphi}, \quad (2)$$

где  $Z_1$  – входное сопротивление ВЧ тракта.

Затухание вследствие отражения, которое равно разности уровня мощности, выдаваемой передатчиком в согласованную нагрузку, и уровня мощности, выдаваемой в нагрузку с затуханием несогласованности  $A_{HC}$ , можно вычислить по формуле:

$$\alpha_{OTP} = A_{HC} - 10 \cdot \lg \left( 10^{0,1 \cdot A_{HC}} - 1 \right) = \\ = 10 \cdot \lg \left( \frac{|m|^2 + 2|m|\cos\varphi + 1}{4|m|\cos\varphi} \right). \quad (3)$$

На рис. 1 приведена зависимость затухания несогласованности от действительной и мнимой составляющих входного сопротивления ВЧ тракта, а на рис. 2 – графики зависимости затухания несогласованности от модуля  $|m|$  комплексного коэффициента  $m$  для разных фазовых углов  $\varphi$ .

Следует отметить, что модуль входного сопротивления ВЧ тракта  $|Z_1|$ , вычисление которого на практике производят по результатам измерений действующих значений тока и напряжения ВЧ сигнала, не дает полной картины о степени согласования с ВЧ трактом. Как видно из рис. 1,  $|Z_1| = 75$  Ом может быть получено как при затухании

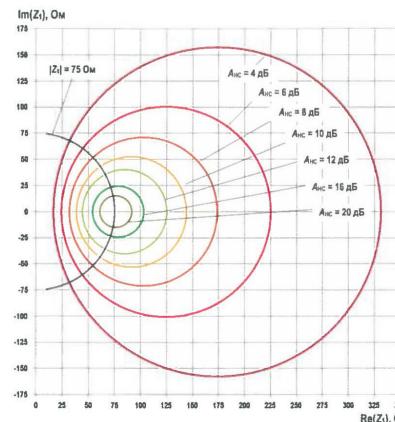


Рис. 1. Зависимость затухания несогласованности от  $Z_1$

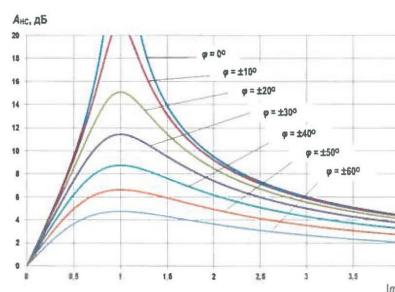


Рис. 2. Зависимость затухания несогласованности от  $|m|$  при значениях фазового угла от  $0^\circ$  до  $\pm 60^\circ$



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  
«Энергостройпроект».



Харламов  
Василий Анатольевич

В 1995 г. окончил Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра радиотехнических систем.

В 2000 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы увеличения скорости передачи информации в синхронных тоновых каналах связи в распределительных электрических сетях среднего и низкого напряжения».

Заместитель  
технического директора  
ООО «Юнител Инжиниринг».

чине фазового угла этого сопротивления, так и при модуле входного сопротивления ВЧ тракта, значительно отличающегося от 75 Ом, но малом фазовом угле. Так, например,  $A_{\text{HC}}^{\text{MAX}}$  равное 6 дБ получается как при  $|m| = 1,45$  и  $\phi = 50^\circ$ , так и при  $|m| = 3$  и  $\phi = 0$ .

Из формулы (1) и рис. 2 можно отметить, что при любом значении фазового угла величина максимально достижимого затухания несогласованности  $A_{\text{HC MAX}}$  соответствует условию  $|m| = 1$ , т.е. при  $|Z_1| = 75$  Ом. Зависимость максимально достижимого значения  $A_{\text{HC MAX}}$  от фазового угла  $\phi$ , полученная из (1) при условии  $|m| = 1$ , имеет вид:

$$A_{\text{HC MAX}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1 + \cos \phi}{1 - \cos \phi} \right). \quad (4)$$

График зависимости максимально достижимой величины  $A_{\text{HC MAX}}$  от модуля фазового угла  $|\phi|$  в диапазоне от  $5^\circ$  до  $60^\circ$  при  $|m| = 1$  приведен на рис. 3. При выборе данного диапазона принималось во внимание, что при  $|\phi|$  от  $0^\circ$  до  $5^\circ$   $A_{\text{HC MAX}}$  заведомо больше требуемого нам значения (стремится к бесконечности), а область от  $60^\circ$  и далее находится вне реально возможного диапазона изменения угла входного сопротивления ВЧ тракта при условии отсутствия неисправностей в устройствах обработки и присоединения и грубых ошибок в проектном решении и его реализации.

Согласно действующей нормативно-технической документации (НТД) [2] нормируемое затухание несогласованности фильтра присоединения (ФП) со стороны ВЧ кабеля должно быть не менее 12 дБ при нагрузке ФП на его номинальное сопротивление со стороны ВЛ. Отметим, что на рис. 1 значения  $A_{\text{HC}}$  более 12 дБ лежат внутри окружности с центром в точке ( $Re(Z) = 85,1$  Ом,  $Im(Z_1) = 0$  Ом) и радиусом 40,2. То есть, если  $Re(Z_1)$  меньше 44,9 Ом или больше 125,3 Ом, то даже при от-

## А<sub>HC MAX</sub>, дБ

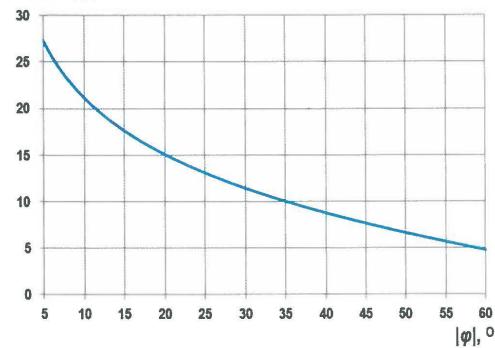


Рис. 3. Зависимость максимально возможного значения затухания несогласованности от  $|\phi|$  при  $|m|=1$

существии мнимой составляющей во входном сопротивлении ВЧ тракта затухание несогласованности всегда будет менее нормируемых 12 дБ, а если модуль  $|Im(Z_1)|$  будет больше 40,2 Ом, то затухание несогласованности опять всегда будет менее 12 дБ. Также следует отметить, что  $A_{\text{HC}}$  при модуле фазового угла  $|\phi|$  более  $28^\circ$  всегда будет меньше нормируемых 12 дБ (рис. 3).

## Использование согласующего трансформатора

Согласование ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта с целью увеличения выдаваемой передатчиком в ВЧ тракт мощности сигнала и соответственно увеличения запаса по затуханию ВЧ канала используется в технике ВЧ связи наиболее часто по сравнению с согласованием для других целей. Это согласование производится с использованием согласующего трансформатора, который реализован или как отдельное устройство, или как отводы обмотки трансформатора на ВЧ окончании аппарата. Рассмотрим область применения такого согласования и его эффективность.

Определим, какой выигрыш по мощности, выдаваемой в ВЧ тракт, можно получить, применяя согласующий трансформатор при допущении, что выходное сопротивление передатчика чисто активное и равно 75 Ом.

Условимся, что коэффициент трансформации согласующего трансформатора  $k_{\text{TP}}$  определяется как отношение числа витков обмотки, присоединенной к ВЧ кабелю, к числу витков обмотки, присоединенной к выходу передатчика ВЧ аппаратуры. С учетом этого приведенный к выходу передатчика коэффициент  $m_{\text{ПРИВ}}$  определяется как:

$$m_{\text{ПРИВ}} = \frac{|m| e^{j\phi}}{k_{\text{TP}}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, использование согласующего трансформатора с коэффициентом трансформации  $k_{\text{TP}}$  приводит к одинаковому для всех частот изменению модуля сопротивления нагрузки  $|Z_1|$ , оставляя неизменным его фазовый угол. Поэтому термин согласование здесь можно использовать только условно, имея в виду, что невозможно получить затухание несогласованности больше, чем определенное по формуле (4) или по рис. 3.

Допустим, что в пределах всей полосы частот ВЧ канала модуль  $|m|$  и фазовый угол  $\phi$  коэффициента  $m$  остаются постоянными. Как показано выше, при любом значении угла  $\phi$  наилучшее согласование получается при  $|m_{\text{ПРИВ}}| = 1$ . Поэтому выигрыш по мощности будем определять сравнением уровней выдаваемой в ВЧ тракт мощности без и с использованием согласующего трансформатора с коэффициентом трансформации, определенным как:

$$k_{\text{TP}} = \sqrt{|m|}. \quad (6)$$

Прирост уровня выдаваемой в ВЧ тракт мощности  $\Delta p_{\text{ПРД}}$ , полученный в результате введения согласую-

щего трансформатора с  $k_{\text{TP}}$  по формуле (6), может быть определен как:

$$\Delta p_{\text{ПРД}} = a_{\text{ОТР}_m} - a_{\text{ОТР}_m k_{\text{TP}}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{|m|^2 + 2|m| \cos \phi + 1}{2|m|(1 + \cos \phi)} \right), \quad (7)$$

где  $a_{\text{ОТР}_m}$  – затухание вследствие отражения без согласующего трансформатора;

$a_{\text{ОТР}_m k_{\text{TP}}}$  – затухание вследствие отражения с согласующим трансформатором.

На рис. 4 приведены графики зависимостей от  $|m|$  выигрыша по мощности при использовании согласующего трансформатора для разных значений угла  $\phi$ . Отметим, что при  $|m|$ , равном 1,8 или 1/1,8, и любом значении  $\phi$  от  $0^\circ$  до  $\pm 60^\circ$  введение согласующего трансформатора увеличивает уровень выдаваемой в ВЧ тракт мощности всего лишь на величину не более 0,5 дБ. Поэтому использование согласующего трансформатора с целью увеличить мощность вводимого в ВЧ тракт сигнала можно рекомендовать только при отлинии модуля его входного сопротивления от 75 Ом не менее чем в 1,8 раза. Но согласующий трансформатор может быть использован для уменьшения степени проявления в ВЧ аппаратуре других нежелательных явлений, связанных с рассогласованием с ВЧ трактом. При этом выдача рекомендаций о необходимом шаге коэффициента трансформации – компетенция производителя ВЧ аппаратуры исходя из принятых в ней схемотехнических решений.

Использование согласующего трансформатора эффективно лишь при незначительном изменении входного сопротивления ВЧ тракта в полосе частот ВЧ ка-

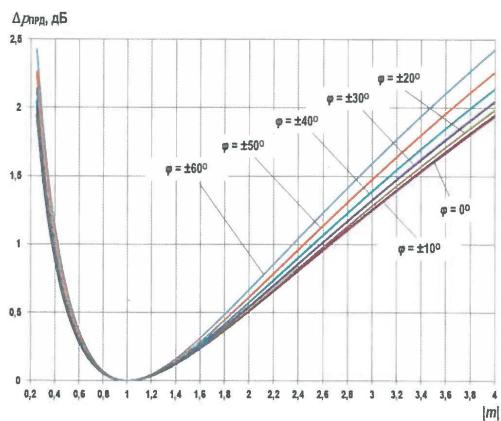


Рис. 4. Зависимость  $\Delta p_{\text{ПРД}}$  от  $|m|$  при значениях фазового угла  $\phi$  от  $0^\circ$  до  $\pm 60^\circ$

нала. А это на практике далеко не всегда так [1]. Кроме того, модуль  $|m|$  и фазовый угол  $\phi$  зависят от коммутационного состояния ВЛ и при его изменении могут существенно меняться. В то же время выбор коэффициента трансформации  $k_{\text{TP}}$ , согласующего трансформатора можно осуществить только на одной частоте и только в одном из коммутационных состояний ВЛ.

Проиллюстрируем сказанное на примерах частотных зависимостей модуля  $|Z_1|$ , фазового угла  $\phi$  и затухания несогласованности  $A_{\text{HC}}$ , определенных для ВЧ трактов 1-ой и 2-ой групп [1] по ВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением фаз. В ВЧ трактах 1-ой группы, которые обладают большим затуханием междуфазной волны на протяжении ВЛ, влияние отраженных ВЧ сигналов на их параметры небольшое, а в ВЧ трактах 2-ой группы данное влияние довольно существенное.

Далее в статье при проведении всех расчетов:

- подключение производится к средней фазе (optимальная схема присоединения);
- используется трехконтурный ФП, выполненный по трансформаторной схеме (рис. 5);
- ВЧ заградитель (ВЧЗ) представлен эквивалентным резистором с нормируемым сопротивлением  $1,43 \cdot Z_{\text{ЛТ}}$ , которое для ВЛ 220 кВ составляет 645 Ом ( $Z_{\text{ЛТ}}$  – номинальная величина характеристического сопротивления линейного тракта по ВЛ) [1];
- ВЧ кабель не учитывается;
- ФП на противоположном конце ВЛ нагружен на резистор 75 Ом.

Анализ проводится для двух коммутационных состояний ВЛ на обоих ее концах:

- ВЛ отключена от сборных шин ПС и не заземлена (режим XX);
- ВЛ отключена от сборных шин ПС и заземлена через ВЧЗ (режим K3).

Проведем расчеты при использовании конденсатора связи (КС) 3200 пФ и выпускаемого промышленностью ФП с рабочей полосой частот 36–63 кГц, обеспечивающего затухание несогласованности не менее 12 дБ по отношению к 75 Ом при нагрузке 450 Ом со стороны ВЛ.

Рассмотрим ВЧ тракт 1-ой группы по ВЛ 220 кВ длиной 270 км без ответвлений со стандартной схемой

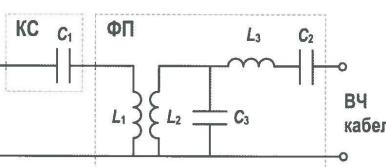


Рис. 5. Схема ФП

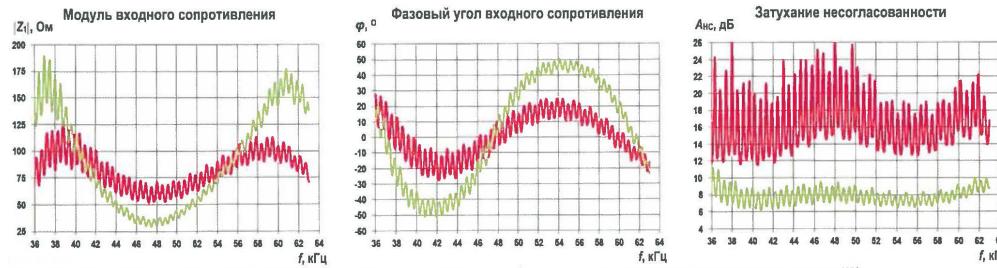


Рис. 6. Пример частотных зависимостей параметров ВЧ тракта 1-ой группы (красная линия – режим XX, зеленая линия – режим К3)

транспозиции фаз. На рис. 6 приведены частотные зависимости параметров данного ВЧ тракта. Небольшие периодические изменения модуля  $|Z_1|$  и фазового угла  $\phi$  входного сопротивления ВЧ тракта обусловлены отраженными от противоположного конца ВЛ волнами ВЧ сигнала небольшого уровня.

Далее будем производить согласование с ВЧ трактом в режиме К3, который по своим параметрам близок к рабочему режиму ВЛ, когда она подключена к сборным шинам ПС [1].

Рассмотрим частоту 48 кГц. Здесь модуль входного сопротивления ВЧ тракта в режиме К3 равен 30 Ом, т.е.  $|m|=0,4$ , а определенный по формуле (6) коэффициент трансформации согласующего трансформатора  $k_{tp}=0,63$ . На рис. 7 приведены частотные зависи-

сти параметров ВЧ тракта в режимах XX и К3 как с согласующим трансформатором, так и без него в полосе 46–50 кГц, ширина которой 4 кГц соответствует стандартному ВЧ каналу. В режиме К3 с согласующим трансформатором модуль входного сопротивления  $|Z_1|$  близок к 75 Ом во всей полосе 46–50 кГц, а на частоте 48 кГц точно равен 75 Ом при фазовом угле 8,6°. Это обуславливает  $A_{nc}$  более 22 дБ на данной частоте, но с ростом фазового угла  $\phi$  на других частотах  $A_{nc}$  уменьшается. В режиме XX без согласующего трансформатора модуль входного сопротивления  $|Z_1|$  относительно близок к 75 Ом, а с согласующим трансформатором в среднем в два раза отличается от 75 Ом, что уменьшает  $A_{nc}$  до 8 дБ. Таким образом, улучшение согласования в режиме К3 привело к его ухудшению в режиме XX.

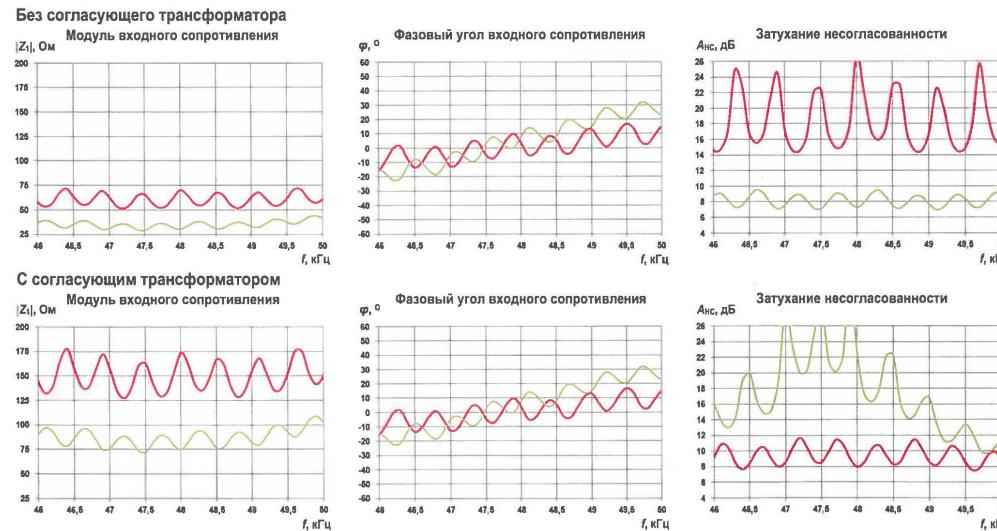


Рис. 7. Частотные зависимости параметров ВЧ тракта 1-ой группы в полосе 46–50 кГц (красная линия – режим XX, зеленая линия – режим К3)

Рассмотрим частоту 54 кГц. Модуль входного сопротивления ВЧ тракта в режиме К3 на данной частоте равен 69 Ом, а фазовый угол – 48°. Большой фазовый угол  $\phi$  на частоте 54 кГц обуславливает низкое  $A_{nc}$ , имеющее величину около 7 дБ. Из-за малого отличия модуля входного сопротивления ВЧ тракта от 75 Ом использование согласующего трансформатора здесь не приведет к какому-либо заметному результату.

Рассмотрим частоту 58 кГц. Здесь модуль входного сопротивления ВЧ тракта в режиме К3 равен 136 Ом, т.е.  $|m|=1,8$ , а определенный по формуле (6) коэффициент трансформации согласующего трансформатора  $k_{tp}=1,34$ . На рис. 8 приведены частотные зависимости параметров ВЧ тракта в режимах XX и К3 в полосе 56–60 кГц как с согласующим трансформатором, так и без него. В режиме К3 с согласующим трансформатором модуль входного сопротивления  $|Z_1|$  относительно незначительно отличается от 75 Ом во всей полосе 4 кГц (немного возрастает с ростом частоты), а на частоте 58 кГц точно равен 75 Ом при фазовом угле 38°. При использовании согласующего трансформатора из-за большого фазового угла  $A_{nc}$  увеличилось на частоте 58 кГц всего до 9,4 дБ. Это гораздо хуже, чем было получено ранее для частоты 48 кГц, где фазовый угол  $\phi$  входного сопротивления небольшой. Следует отметить, что полученное с использованием согласующего трансформатора  $A_{nc}$  в переделах полосы 56–60 кГц с ростом фазового угла  $\phi$  уменьшается, а с его уменьшением – увеличивается. В режиме XX без согласующего

трансформатора модуль входного сопротивления ВЧ тракта в среднем в 1,3 раза больше 75 Ом, а с ним – в 1,3 раза меньше при одном и том же фазовом угле  $\phi$ . Поэтому в режиме XX с согласующим трансформатором  $A_{nc}$  мало изменилось.

Можно сделать вывод, что в ВЧ трактах 1-ой группы за исключением некоторых диапазонов частот, где модуль входного сопротивления ВЧ тракта близок к 75 Ом, согласующие трансформаторы позволяют улучшить согласование в том коммутационном режиме ВЛ, в котором производилось измерение модуля входного сопротивления. Причем согласование можно улучшить не только на одной частоте, но и в стандартной полосе ВЧ канала 4 кГц. При изменении коммутационного режима ВЛ согласование с ВЧ трактом при использовании согласующих трансформаторов может существенно ухудшиться.

Следует отметить, что если применить ВЧЗ с активной составляющей сопротивления блокировки больше чем  $1,43 \cdot Z_{lt}$ , т.е. для ВЛ 220 кВ не 645 Ом, а например, 1000 Ом, что иногда используют для уменьшения рабочего затухания ВЧ тракта, то отличие его входных сопротивлений в режимах XX и К3 уменьшится, а затухание несогласованности в режиме К3 увеличится. Но увеличение сопротивления блокировки ВЧЗ уменьшает его полосу заграждения, а для ее увеличения требуется увеличивать индуктивность реактора, что не всегда осуществимо на практике.

В любом случае, использование согласующего трансформатора позволяет уменьшить нагрев ВЧ аппар-

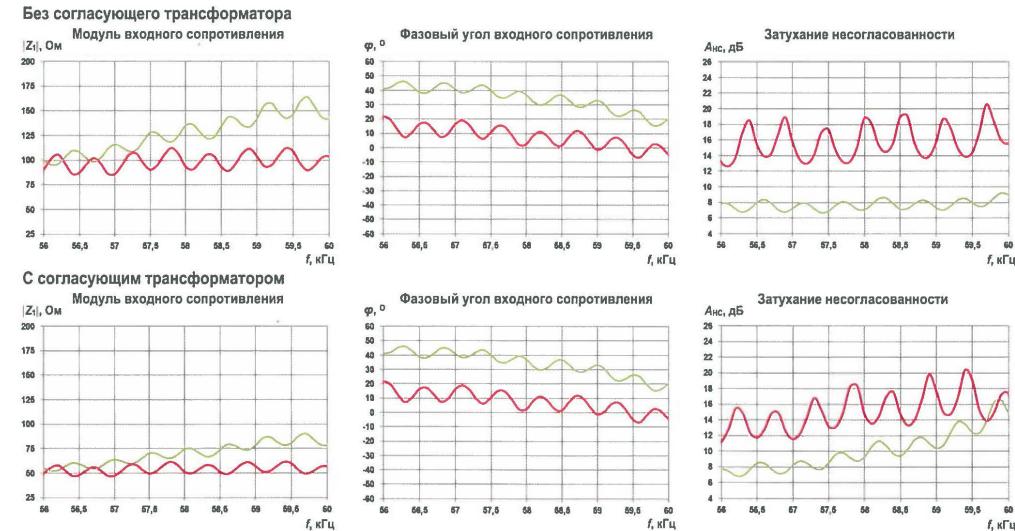


Рис. 8. Частотные зависимости параметров ВЧ тракта 1-ой группы в полосе 56–60 кГц (красная линия – режим XX, зеленая линия – режим К3)

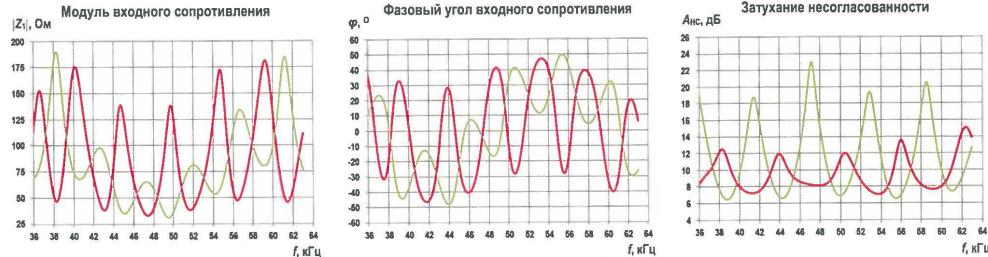


Рис. 9. Пример частотных зависимостей параметров ВЧ тракта 2-ой группы (красная линия – режим XX, зеленая линия – режим K3)

аппаратуры при низком входном сопротивлении ВЧ тракта и уменьшить нелинейные искажения в передатчике, связанные с тем, что при входном сопротивлении ВЧ тракта существенно выше его номинального значения напряжение усиливаемого сигнала выходит за пределы, определяемые напряжением питания УМ.

Рассмотрим ВЧ тракт 2-ой группы по ВЛ 220 кВ длиной 27 км без ответвлений и транспозиций фаз. На рис. 9 приведены частотные зависимости параметров данного ВЧ тракта. Можно отметить, что модуль входного сопротивления ВЧ тракта и его фазовый угол в полосе 4 кГц, и даже 2 кГц, изменяются довольно широко в широких пределах. Таким образом, использование согласующего трансформатора для согласования в широкой полосе частот в ВЧ трактах 2-ой группы неэффективно.

Отметим, что может возникнуть впечатление, что в 2-ой группе относятся все ВЧ тракты по коротким ВЛ. На самом деле это не так, т.к. принадлежность ВЧ тракта к группе определяется не длиной ВЛ, а затуханием междуфазной волны на ее протяжении. Если ее затухание в ВЧ тракте более 15 дБ, то ВЧ тракт даже на короткой ВЛ можно отнести к 1-ой группе. Это является еще одним аргументом в пользу отказа от использования на коротких ВЛ «низких» рабочих частот, где по сравнению с «высокими» рабочими частотами затухание междуфазной волны невелико (при обеспечении требуемого запаса по затуханию ВЧ канала). В то же время, если на длинной ВЛ недалеко от ПС есть ответвление и затухание междуфазной волны на протяжении от ПС до ответвления невелико, то по своим параметрам данный ВЧ тракт может быть отнесен к ВЧ трактам 2-ой группы.

#### Согласование с помощью аттенюатора

Рассмотрим согласование ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта с использованием аттенюаторов. Этот метод рассмотрен в [3], и здесь мы лишь повторим основные его положения и приведем пример его эффективности.

Схема подключения аттенюатора на одном из концов ВЧ тракта приведена на рис. 10. Аттенюатор должен устанавливаться на том конце ВЧ тракта, на котором требуется улучшить согласование ВЧ аппаратуры и

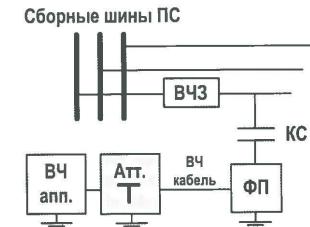


Рис. 10. Подключение аттенюатора на одном из концов ВЧ тракта

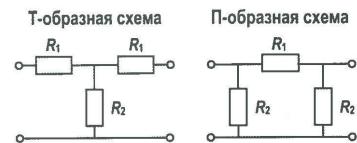


Рис. 11. Схемы аттенюаторов

ВЧ тракта. Отметим, что установка аттенюатора может понадобиться на обоих концах ВЧ тракта.

Необходимое затухание аттенюатора  $a_{ATT}$  определяется как:

$$a_{ATT} = \frac{\Delta A_{nc}}{2} = \frac{A_{nc,req} - A_{nc,sp}}{2}, \quad (8)$$

где  $\Delta A_{nc}$  – требуемое увеличение затухания несогласованности;

$A_{nc,sp}$  – затухание несогласованности, требуемое для обеспечения работы ВЧ аппаратуры с нормируемыми параметрами;

$A_{nc,req}$  – затухание несогласованности ВЧ тракта без аттенюатора.

Аттенюатор может быть реализован как по Т-образной, так и П-образной схеме (рис. 11).

Величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , необходимые для реализации аттенюатора с затуханием  $a_{ATT}$ , определяются как:



Рис. 12. Частотные зависимости параметров ВЧ тракта 2-ой группы при использовании аттенюатора (красная линия – режим XX, зеленая линия – режим K3)

$$R_2 = \frac{75}{\operatorname{sh}(0,1151 \cdot a_{ATT})} \quad \text{и} \quad R_1 = R_2 (\operatorname{ch}(0,1151 \cdot a_{ATT}) - 1) \quad (9)$$

для Т-образной схемы,

$$R_1 = 75 \cdot \operatorname{sh}(0,1151 \cdot a_{ATT}) \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{R_1}{\operatorname{ch}(0,1151 \cdot a_{ATT}) - 1} \quad (10)$$

для П-образной схемы.

Рассмотрим применение аттенюатора в ВЧ тракте 2-ой группы по ВЛ 220 кВ длиной 27 км, частотные зависимости параметров которого приведены на рис. 9. На рис. 12 показаны частотные зависимости параметров данного ВЧ тракта при установке аттенюатора с затуханием 3 дБ.

Из рис. 9 и 12 видно, что, как и ожидалось, введение аттенюатора с затуханием 3 дБ привело к увеличению затухания несогласованности на 6 дБ на всех частотах независимо от коммутационного состояния ВЛ. При этом по сравнению с применением согласующего трансформатора установка аттенюатора уменьшает не только отличие модуля входного сопротивления  $|Z_1|$  от его номинального значения 75 Ом, но и величину фазового угла  $\phi$ .

При установке аттенюатора на одном конце ВЧ тракта его рабочее затухание увеличивается на  $a_{ATT}$ , а при установке на двух концах – на  $2 \cdot a_{ATT}$ . При проектировании ВЧ каналов с установкой аттенюаторов на двух концах ВЧ тракта минимальный уровень приема можно выбирать на  $a_{ATT}$  меньше, чем в случае их отсутствия, т.к. аттенюатор вносит в направлении приема одинаковое затухание как для полезных, так и мешающих сигналов (помех). Поэтому, несмотря на то, что при установке аттенюаторов на обоих концах ВЧ тракта его рабочее затухание увеличивается на  $2 \cdot a_{ATT}$ , запас по затуханию ВЧ канала уменьшается только на  $a_{ATT}$ .

Применение аттенюаторов для согласования можно рекомендовать только в ВЧ трактах 2-ой группы. В ВЧ трактах 1-ой группы использование аттенюаторов, как правило, затруднительно, так как приводит к недопустимо большому увеличению их рабочего затухания, что не всегда позволяет обеспечить требуемый запас по затуханию ВЧ каналов.

#### Использование ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ

Действующая НТД [2] определяет, что затухание несогласованности ФП со стороны ВЧ аппаратуры должно быть не менее 12 дБ по отношению к 75 Ом при его нагрузке со стороны ВЛ на номинальную величину характеристического сопротивления линейного тракта  $Z_{lt}$ . В [1] показано, что при использовании устройства присоединения (УП) к ВЛ, представляющего собой индуктивный трансформатор без потерь с коэффициентом трансформации  $\sqrt{\frac{Z_{lt}}{75}}$ , в режиме XX затухание несогласованности  $A_{nc}$  будет равно бесконечности, а в режиме K3 – 11,7 дБ, т.е. в режиме XX  $A_{nc}$  значительно больше требуемого нам значения, а в режиме K3 – меньше. Следует отметить, что на российском рынке в основном представлены ФП, при проектировании которых для реализации максимально широкой рабочей полосы частот их характеристическое сопротивление со стороны ВЛ задавалось выше  $Z_{lt}$ , но не более чем 1,67  $Z_{lt}$  для обеспечения затухания несогласованности не хуже 12 дБ по отношению к  $Z_{lt}$ . Такой подход при проектировании ФП значительно ухудшает затухание несогласованности входного сопротивления ВЧ трактов в режиме K3 по сравнению с 11,7 дБ, полученными для рассмотренного выше УП. Примером этого служат частотные зависимости на рис. 6 при использовании выпускаемого промышленностью ФП.

Если должным образом уменьшить характеристическое сопротивление ФП со стороны ВЛ, то со стороны ВЧ аппаратуры это приведет к улучшению согласования в режиме K3 при обеспечении требуемого согласования в режиме XX.

Как показано в [1], со стороны ВЛ в режиме XX ФП нагружен на сопротивление  $Z_{lt}$ , а в режиме K3 при использовании эквивалента ВЧЗ с сопротивлением 1,43  $Z_{lt}$  – на сопротивление 0,588  $Z_{lt}$ . Среднегеометрическое значение этих двух сопротивлений равно 0,767  $Z_{lt}$ , что для характеристического сопротивления линейного тракта по ВЛ 220 кВ, равного 450 Ом, составляет 345 Ом. При использовании УП с коэффициентом



трансформации  $\sqrt{\frac{345}{75}}$  в режиме ХХ с нагрузкой со стороны ВЛ 450 Ом входное сопротивление ВЧ тракта составит 97,8 Ом ( $A_{\text{nc}} = 17,6$  дБ), а в режиме К3 с нагрузкой 265 Ом – 57,6 Ом ( $A_{\text{nc}} = 17,6$  дБ), т.е. здесь затухание несогласованности в режимах ХХ и К3 одинаково и превышает требуемое 12 дБ.

В качестве примера с участием к.т.н. Анатолия Федоровича Онанко был рассчитан ФП для КС 3200 пФ, среднегеометрическая частота которого примерно такая же, как и используемого при расчетах ранее, а характеристическое сопротивление ФП со стороны ВЛ на чисто активное и равно 345 Ом. Частотные зависимости параметров данного ФП со стороны ВЧ аппаратуры в рабочей полосе частот 42–55 кГц приведены на рис. 13. У рассчитанного ФП на среднегеометрической частоте затухание несогласованности со стороны ВЧ аппаратуры при нагрузке со стороны ВЛ 345 Ом стремится к бесконечности, а при нагрузках 450 Ом и 265 Ом равно 17,6 дБ, как и в случае с рассмотренным выше УП с коэффициентом трансформации  $\sqrt{\frac{345}{75}}$ . В полосе 42–55 кГц затухание несогласованности не менее нормируемых 12 дБ как при сопротивлении нагрузки со стороны ВЛ 450 Ом (режим ХХ с сопротивлением  $Z_{\text{lt}}$ ), так и 265 Ом (режим К3 с сопротивлением  $0,588 \cdot Z_{\text{lt}}$ ), что было сделано в

Совершенно очевидно, что данный ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ полностью соответствует действующей НТД [2], т.к. обеспечивает затухание несогласованности со стороны ВЧ аппаратуры не менее 12 дБ по отношению к 75 Ом при нагрузке со стороны ВЛ на номинальную величину характеристического сопротивления линейного тракта  $Z_{\text{lt}}$ .

На рис. 14 приведены частотные зависимости параметров ВЧ тракта 1-й группы на рассмотренной ранее ВЛ 220 кВ длиной 270 км при использовании рассчитанного ФП для КС 3200 пФ с рабочей полосой частот 42–55 кГц. Сравнение рис. 6 и 14 показывает существенное улучшение согласования в режиме К3 при использовании ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ.

Таким образом, для улучшения согласования ВЧ аппаратуры и ВЧ трактов 1-й группы в режиме К3, который близок по ВЧ параметрам к рабочему режиму ВЛ, могут быть использованы ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ, при котором со стороны ВЧ аппаратуры обеспечивается затухание несогласованности не менее 12 дБ по отношению к сопротивлению 75 Ом как при нагрузке со стороны ВЛ  $Z_{\text{lt}}$  в режиме ХХ, так и 0,588· $Z_{\text{lt}}$  в режиме К3. При этом совершенно не обязательно на среднегеометрической частоте ФП обеспечивать характеристическое сопротивление со стороны ВЛ точно равным 0,767· $Z_{\text{lt}}$ , как это было сделано в

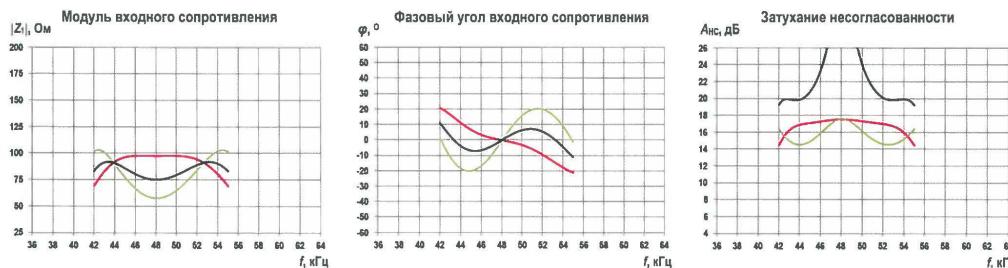


Рис. 13. Частотные зависимости параметров рассчитанного ФП при различных сопротивлениях нагрузки со стороны ВЛ (черная линия – 345 Ом, красная линия – 450 Ом, зеленая линия – 265 Ом)

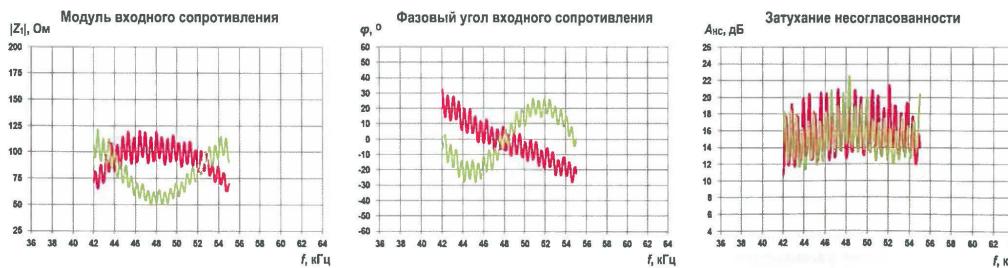


Рис. 14. Частотные зависимости параметров ВЧ тракта 1-й группы при использовании рассчитанного ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ (красная линия – режим ХХ, зеленая линия – режим К3)

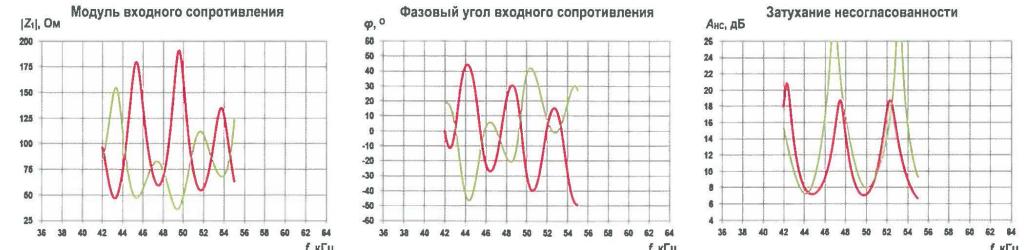


Рис. 15. Частотные зависимости параметров ВЧ тракта 2-й группы при использовании рассчитанного ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ (красная линия – режим ХХ, зеленая линия – режим К3)

примере выше, т.к. подходы к реализации обеспечения затухания несогласованности ВЧ тракта 12 дБ в режимах ХХ и К3 могут несколько отличаться. Но при любых подходах, цена такого улучшения согласования – уменьшение рабочей полосы частот ФП, что не всегда критично, например, для каналов ВЧ защищенных с полосой 2 кГц.

Следует отметить, что реальное характеристическое сопротивление линейного тракта по ВЛ несколько отличается от его номинальной величины, приведенной в НТД [2]. Оно зависит от конструкции ВЛ, ее коммутационного состояния, фазы, к которой произведено подключение, сопротивления грунта и частоты. Например, в ВЧ трактах, для которых производились расчеты, характеристическое сопротивление линейного тракта равно:

- 471,6 Ом в режиме ХХ и в 437,6 Ом режиме К3 на частоте 48 кГц;
- 466,3 Ом в режиме ХХ и в 435,1 Ом режиме К3 на частоте 100 кГц;
- 461,1 Ом в режиме ХХ и в 432,6 Ом режиме К3 на частоте 250 кГц.

Но в любом случае, уменьшение характеристического сопротивления ФП со стороны ВЛ по сравнению с ФП, которые в основном представлены на российском рынке, и у которых оно выше номинальной величины характеристического сопротивления линейного тракта  $Z_{\text{lt}}$ , окажет положительное влияние на согласование с ВЧ трактом в режиме К3.

При проектировании расчет рабочего затухания ВЧ трактов с использованием ФП с оптимизированным характеристическим сопротивлением со стороны ВЛ можно проводить по методикам, приведенным в действующей НТД, т.к. вносимое ФП затухание при этом изменяется незначительно.

На рис. 15 приведены частотные зависимости параметров ВЧ тракта 2-й группы на рассмотренной ранее ВЛ 220 кВ длиной 270 км при использовании рассчитанного ФП для КС 3200 пФ с рабочей полосой частот 42–55 кГц. Сравнение рис. 9 и 15 показывает, что при использовании ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ затухание несогласованности в среднем улучшилось как в режиме ХХ, так и в режиме

К3, но минимальное его значение осталось примерно тем же в режиме ХХ и немного улучшилось на величину чуть более 0,5 дБ в режиме К3. Такая картина связана с большим влиянием отраженных волн ВЧ сигнала на входное сопротивление ВЧ тракта 2-й группы.

#### Выводы

Производитель ВЧ аппаратуры должен регламентировать в технической документации диапазон входного сопротивления ВЧ тракта, в котором она работает в рамках нормируемых параметров. Без этих данных при проектировании, наладке и эксплуатации невозможно определить, требуется ли улучшать согласование передатчика ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта и, если требуется, то с какой степенью.

Для улучшения согласования передатчика ВЧ аппаратуры и ВЧ трактов 1-й группы могут быть использованы как согласующие трансформаторы с указанными выше ограничениями, так и ФП с оптимизированным сопротивлением со стороны ВЛ. В ВЧ трактах 2-й группы такое согласование малоэффективно. В ВЧ трактах 2-й группы, обладающих небольшим рабочим затуханием, для улучшения согласования эффективно использование аттенюаторов.

Применение ВЧЗ с сопротивлением блокировки выше нормируемого в НТД приводит не только к уменьшению рабочего затухания ВЧ тракта, но и улучшению согласования передатчика ВЧ аппаратуры и ВЧ тракта в рабочем коммутационном состоянии ВЛ.

На коротких ВЛ, если это возможно, следует избегать использования рабочих частот ВЧ каналов в нижней части разрешенного для них диапазона частот, на которых затухание междуфазной волны ВЧ сигнала невелико.

#### Литература:

1. Шкарин Ю.П., Харламов В.А. Входное сопротивление и затухание несогласованности ВЧ трактов по воздушным ЛЭП // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №4 (45). – С. 16–23.
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. Меркулов А.Г., Шкарин Ю.П., Романов С.Е., Харламов В.А., Назаров Ю.В. Цифровые каналы высокочастотной связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 240 с.