

УДК 621.317

ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ВЫШЕ 7 ГГц

Д. В. Заневский, к. т. н., доцент, доцент кафедры радиотехники и электроники
УО «Военная академия Республики Беларусь»

Н. А. Тарабаш, младший научный сотрудник НИИЛ ЭМИ НИИЦ ОАО «Гипросвязь»

В статье приводятся основные результаты теоретического и экспериментального исследования взаимного влияния воздушных линий электропередачи, аппаратуры ВЧ-связи по этим линиям и радиорелейных терминалов в диапазоне частот выше 7 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в процессе дальнейшего развития систем сотовой связи и перехода на стандарты 4G и 5G происходит уменьшение размера сот для обеспечения полного покрытия территории. Это требует проектирования и строительства новых объектов. Увеличение плотности базовых станций операторов сотовой связи приводит к проблеме отсутствия свободных участков для строительства новых базовых станций. Одним из возможных путей решения данной проблемы является приближение их к зонам ограничений застройки и, в частности, к воздушным линиям электропередачи (ВЛ). В этих условиях становится более насущным вопрос ограничений по взаимному размещению ВЛ и радиорелейных станций (PPC) в составе базовых станций операторов сотовой связи, определенных в ТКП 339-2022 (33240) [1] и ТКП 222-2010 (02140) [2]. Согласно [1] и [2] PPC должны размещаться на расстоянии более 100 м от ВЛ напряжением до 35 кВ, 200 м – при напряжении высоковольтных линий 110–220 кВ и 250 м – при напряжении высоковольтных линий 330–750 кВ, если ВЛ находится за пределами основного лепестка диаграммы направленности. Если ВЛ расположена в направлении излучения основного лепестка, то эти расстояния увеличиваются в 5 раз.

Актуальность данных исследований возрастает вследствие того, что энергетикам тоже требуется радиорелейная связь для обмена служебной информацией. То есть вместо затрат материальных ресурсов и времени на проектирование, экспертизу проектной документации, строительство новых вышек было бы намного выгоднее разместить антенну на опоре ВЛ на высоте до 22 м. Требования по территориальному разнесу ВЛ и PPC приведены независимо от частотного диапазона радиорелейной линии связи, а этот диапазон занимает широкую полосу от 450 МГц до 80 ГГц.

Объектом наших исследований являются PPC в диапазоне частот выше 7 ГГц. Цель работы – проведение теоретической оценки и экспериментальных исследований для

определения степени и механизмов их взаимного влияния в диапазоне частот выше 7 ГГц.

Предметом исследования являются следующие вопросы:

1. Влияние помехоэмиссии ВЛ на приемники PPC.
2. Влияние помехоэмиссии сигналов аппаратуры ВЧ-связи по ВЛ на приемники PPC.
3. Влияние передатчика аппаратуры PPC на работу приемников аппаратуры ВЧ-связи по ВЛ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим источники помехи ВЛ другим радиосредствам: 1) коронные разряды на проводах, изоляторах и арматуре ЛЭП; 2) поверхностные разряды на изоляторах и арматуре; 3) искрение, вызванное подгоревшими контактами, коммутацией в преобразователях переменного тока.

Коронные разряды вызываются высоким градиентом потенциала на некоторых участках поверхности такой арматуры, как защитные кольца или полукольца, распорки и соединения, а также на проводах. Напряжение, приложенное к арматуре, постепенно повышается, и на ней происходят многочисленные процессы разряда. Только некоторые из них способны создавать радиопомехи. Они возникают в следующем порядке: начальный стример, свечение и стример начала пробоя при положительной короне; отрицательные импульсы (импульсы Тричела), свечение и стример начала пробоя при отрицательной короне. Свечение не создает радиопомех, отрицательные импульсы создают низкие уровни радиопомех, начальные стримеры создают их при очень высоких напряжениях. Наиболее высокие уровни помех возникают при коронном разряде, соответствующем положительному и отрицательному стримеру начала пробоя.

Поверхностные заряды на изоляторах могут быть вызваны различными причинами, например увеличением локальных градиентов на них, неоднородностями в виде налетов сухих веществ или капель воды или искрением на сухих участках, вызванным токами утечки на загрязненных

изоляторах. Радиопомехи могут возникать в результате разрядов между цементом и фарфором или стеклом, если на стыках между ними имеются небольшие воздушные зазоры. На гирлянде изоляторов помехи зависят от распределения напряжения на гирлянде, которое становится менее равномерным с увеличением числа изоляторов.

Искрение, вызванное подгоревшими контактами, коммутацией в преобразователях переменного тока, вызывает излучение помех с более низкой граничной частотой, чем у коронных разрядов. Максимум спектра такого излучения лежит в районе частоты напряжения промышленной частоты. Когда линейное напряжение и, следовательно, напряженность поля в зазоре превышают критическое значение, пакет искр возникает в течение каждого полупериода.

Нормы на уровни излучаемых радиопомех устанавливаются на все линии переменного тока и подстанции с рабочим напряжением от 1 до 800 кВ. Базисная частота для норм 0,5 МГц на опорном расстоянии $r_{оп}$ 20 м. Уровни помех, создаваемые ВЛ, зависят от номинального напряжения, погодных условий и других факторов, однако CISPR [3] устанавливает на данные уровни нормы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Нормы излучаемых помех от ВЛ на 20 м и частоте 0,5 МГц

Диапазон частот	47–68 МГц	87–108 МГц	174–230 МГц
Уровень помех	48 дБ (мкВ/м)	54 дБ (мкВ/м)	55 дБ (мкВ/м)

В зависимости от расстояния уровень помехи уменьшается по закону

$$E(r) = E(20) - k \cdot 20 \log(r/20), \quad (1)$$

где r – расстояние от ВЛ, м; k – коэффициент скорости убывания (таблица 2).

Таблица 2 – Степень убывания поля с увеличением расстояния

Диапазон частот	0,15–0,4 МГц	0,4–30 МГц	30–100 МГц	100–300 МГц
k	1,8	1,65	1,2	1,0

Спектр помех, создаваемых ВЛ, в соответствии с отчетами CISPR [3,4] лежит в диапазоне 0,15–3000 МГц и не пересекается с рассматриваемыми диапазонами радиорелейных станций (рисунок 1).

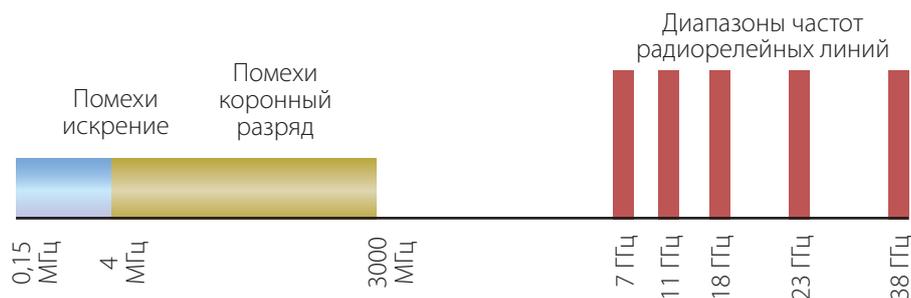


Рисунок 1 – Спектры помех от ВЛ и РРС

Зависимость напряженности поля излучаемых помех от частоты точно не определена, поэтому примем стандартную величину ослабления по внеполосным излучениям равной 60 дБ. Уровень помех в этом случае у антенны приемника РРС на расстоянии 20 м составит -5 дБ (мкВ/м), что составляет 0,562 мкВ/м.

Для передачи речи, телемеханики, данных, сигналов релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) используется многофункциональная каналообразующая аппаратура с цифровой обработкой сигналов и необходимыми интерфейсными модулями. Для передачи сигналов дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) используется специализированная ВЧ-аппаратура.

В системе электросвязи по линиям электропередач мощность сигнала подается модемом в провод под напряжением и нейтральный провод, ток ВЧ-сигнала в каждом проводе должен быть равным по амплитуде и противоположным по направлению. В этом случае двухпроводная линия считается симметричной и излучать не будет. Токи в двух проводах содержат компоненты, текущие в том же направлении. Эти совпадающие по фазе компоненты действуют как так называемые антенные токи, которые становятся главным источником нежелательного излучения (приема помех) от системы электросвязи по линиям электропередач. Такой режим называется ассиметричным режимом и является основным источником взаимного влияния. Их появление и уровень зависят только от разности нагрузок проводов ВЛ, по которым работает ВЧ-связь.

Для организации ВЧ-каналов по линиям высокого напряжения используется диапазон частот 16–1000 кГц. Нижняя граница по частоте ограничена параметрами устройств обработки и присоединения, так как на низких частотах для получения удовлетворительных параметров ВЧ-тракта необходимы большие значения индуктивностей реакторов заградителей и емкостей конденсаторов связи. Верхняя граница частотного диапазона обусловлена допустимым значением линейного затухания, возрастающего с увеличением частоты, а также требованиями по электромагнитной совместимости со средствами связи других ведомств.

При проектировании систем ВЧ-связи учитываются требования Правил использования диапазона частот 16–1000 кГц при передаче информации [5, Прил. 1].

Для аппаратуры связи в полосе частот 116–1000 кГц ограничена мощность передатчика не более 35 Вт на расстоянии от аэродромов менее 5 км, при мощности передатчика более 35 Вт работа не ведется по несимметричным

схемам подключения, а при мощности передатчика более 100 Вт запрещены все схемы подключения за исключением симметричной.

Для аппаратуры релейной защиты, противоаварийной автоматики и телемеханики в полосе частот 116–600 кГц максимальная мощность передатчика не должна превышать 5 Вт и в диапазоне от 1,5 до 5 Вт должны использоваться только симметричные схемы подключения.

Таким образом, основным каналом взаимного влияния является частотный диапазон 32 кГц – 1 МГц. При больших мощностях аппаратуры ВЧ-связи используется только симметричная схема подключения. Следовательно, на пути взаимных помех, в отличие от помех ВЛ, встают две составляющие затухания. Первая – затухание по внеполосным излучениям или побочным каналам приема, вторая – затухание при излучении или приеме симметричными проводными линиями. Суммарное значение затухания составляет более 100 дБ.

Из рассмотренных двух случаев можно сделать вывод, что наиболее существенным является вопрос оценки влияния помех от ВЛ на РРС.

Рассмотрим критерий обеспечения электромагнитной совместимости. Для РЭС фиксированной службы критерий помехозащищенности приведен в рекомендации ITU F.758-6 [6] и для рассматриваемого частотного диапазона I/N составляет -10 дБ. То есть предельный уровень помехи должен быть ниже суммарного уровня собственных и внешних шумов на величину 10 дБ.

Допустимый уровень помех на входе приемника определяется выражением

$$P_{n, доп} = P_{ш} - 10, \tag{2}$$

где $P_{ш}$ – суммарная мощность шумов на входе приемника, дБм; $P_{n, доп}$ – максимально допустимый уровень помехи на входе приемника рецептора помех, дБм.

Таким образом, критерий обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) принимает вид:

$$P_n \leq P_{n, доп} \tag{3}$$

Спектральная плотность мощности собственного шума приемника для типовой РРС составляет -110 дБм/МГц. Следовательно, для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) спектральная плотность мощности помехи не должна превышать -120 дБм/МГц, а для самой узкой полосы приемника 5 МГц – не превышать -113 дБ.

Для оценки P_n пересчитаем напряженность поля у антенны (0,562 мкВ/м) в мощность помехи на входе приемника. Плотность потока мощности (P_A) на входе антенны:

$$P_A = E^2 / (120 \pi) = 8,38 \cdot 10^{-13} \text{ мВт/м}^2 \tag{4}$$

Мощность (P_n) на входе приемника при условии отсутствия потерь в фидере

$$P_n = P_A S_{эфф} = P_A \lambda^2 G_m / (4 \pi) = P_A 0,3^2 G_m / (4 \pi f^2) = 1,22 \cdot 10^{-12} \text{ мВ} \tag{5}$$

или -119,3 дБм,

где f – частота (Гц).

Данное значение уровня помех на входе приемника получено для самых неблагоприятных условий, влияние

ВЛ на приемник РРС по основному лепестку с коэффициентом усиления (КУ) $G_m = 10000$ (40 дБ) и частоты 7 ГГц. Даже для этого случая выполняется критерий обеспечения ЭМС (3), т. к. мощность помех не превышает уровень собственных шумов приемника (-113 дБ) при самой узкой полосе приемника. При увеличении полосы приемника, меньших значениях КУ антенны, увеличении частоты РРС уровень помех будет еще ниже.

В случае влияния основного излучения помех на побочные каналы приема РРС данное влияние будет еще ниже, т. к. на частоте 1 ГГц, у антенны с номинальной частотой 7 ГГц КУ антенны снизится на 3 порядка из-за уменьшения волновых размеров апертуры и рассогласования антенны с фидером.

В наших теоретических расчетах есть только одно слабое звено – на сколько порядков уменьшается мощность помех ВЛ на частоте 7 ГГц. Мы приняли цифру 60 дБ (на 6 порядков), исходя из аналогий ослабления излучения передатчика по побочным и внеполосным излучениям. Однако в литературе имеется информация об уровне помех только до 3 ГГц.

В соответствии с этим проведены экспериментальные исследования влияния ВЛ 750 кВ (максимальное напряжением ВЛ на территории Республики Беларусь) на РРС диапазонов частот 7 и 38 ГГц. Методика выполнения измерений выбрана так, чтобы обеспечить одинаковые условия распространения радиоволн при наличии и отсутствии помех от ВЛ. При этом интерференция прямой и отраженных радиоволн не будет влиять на характеристики качества радиосвязи. Для этого радиосредства размещались на неизменных позициях, а измерения характеристик качества радиосвязи проводили при включенной и выключенной ВЛ.

Критерием отсутствия влияния ВЛ на РРС является то, что уровень помехи от ВЛ в полосе приемника не должен превышать уровень внутренних шумов на величину более 10 дБ (2). Это приведет к деградации чувствительности приемника не более чем на 0,5 дБ. Такая деградация чувствительности, в соответствии с рекомендацией ITU F.758-6 [6], проявляется в виде ухудшения значения битовых ошибок (BER) не более 10 %.

Для проверки выполнения данного критерия необходимо:

- установить уровень сигнала на входе приемника при отсутствии помехи на уровне чувствительности приемника, для чего уменьшать ЭИИМ радиолинии, пока уровень BER не достигнет значения 10^{-6} (типовой уровень для измерения чувствительности);
- включить напряжение на ВЛ 750 кВ;
- измерить значение BER.

Критерием обеспечения ЭМС будет то, что BER не изменится или увеличится на величину, не превышающую 10 % ($1,1 \cdot 10^{-6}$).

Схема проведения измерений приведена на рисунке 2.

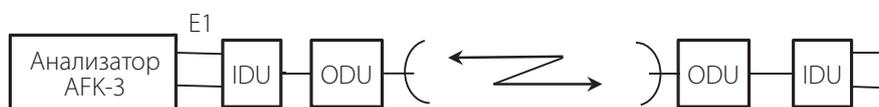


Рисунок 2 – Структурная схема измерений уровня деградации чувствительности

Измерения проводились при температуре 0 ... – 3°C при влажности 80 % после снегопада с дождем в декабре месяце при максимальной вероятности появления коронных и поверхностных разрядов на проводах и арматуре, а также искрения, вызванного подгоревшими контактами.

Размещение антенн на вышке приведено на рисунке 3.



Рисунок 3 – Размещение антенн PPC 7 ГГц (ниже) и 38 ГГц на мачте

Радиосвязь устанавливалась при поперечном ВЛ расположении радиосредств на расстоянии 20 м от ВЛ (ВЛ в направлении основного лепестка ДН антенны) и продольном расположении на расстоянии между ними 40 м и от ВЛ на 20 м (ВЛ вне направления основного лепестка). Расположение радиосредств приведено на рисунке 4.



Рисунок 4 – Размещение PPC 7 ГГц и 38 ГГц на местности

Эксперимент проводился на базе Слуцких энергосетей. Для включения и выключения ВЛ использовался период постановки данной ВЛ на техническое обслуживание с выключением электроэнергии. Для эксперимента использовалась PPC MINI-LINK TN (MLTN).

При проведении эксперимента оказалось, что теоретическая методика не всегда практически осуществима. Дело в том, что аппаратура PPC позволяет уменьшать мощность с дискретностью 1 дБ, а дополнительные аттенюаторы между внешним блоком ODU и антенной установить невозможно, т. к. они выполнены единым блоком. Поэтому при каком-то уровне мощности передатчика BER равен нулю или много меньше 10^{-6} , а на уровне, меньшем на 1 дБ, происходит явление «внезапного отказа» цифровой радиолинии, и связь обрывается. По этой причине было принято решение уровень деградации чувствительности, кроме BER, контролировать по уровню SNIR (отношение сигнал / (шум + помеха)), измеряемому приемником PPC.

Результаты эксперимента приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Результаты измерений при поперечном размещении сайтов

750 кВ вкл.	BER < 10 ⁻⁶			BER > 10 ⁻⁶			
	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{BA} , дБм
MLTN 7 ГГц	-3	-59,1	33	-4	-59,8	32	-91,2
MLTN 38 ГГц	-6	-57,5	34	-7	-58,4	33	-84,9
750 кВ выкл.	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{BA} , дБм
MLTN 7 ГГц	-3	-58,6	34	-4	-59,4	33	-91,2
MLTN 38 ГГц	-6	-57,1	34	-7	-58,0	32	-84,9

Таблица 4 – Результаты измерений при продольном размещении сайтов

750 кВ вкл.	BER < 10 ⁻⁶			BER > 10 ⁻⁶			
	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{BA} , дБм
MLTN 7 ГГц	-2	-58,6	33	-3	-59,0	32	-91,2
MLTN 38 ГГц	-5	-57,3	34	-6	-58,4	33	-84,9
750 кВ выкл.	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{trm} , дБм	P_{rsvr} , дБм	SNIR, дБ	P_{BA} , дБм
MLTN 7 ГГц	-2	-58,6	34	-3	-59,4	33	-91,2
MLTN 38 ГГц	-5	-57,3	34	-6	-58,5	32	-84,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальные исследования показали, что в диапазоне частот выше 7 ГГц включительно помехи от воздушных линий электропередачи в полосе приемника радиорелейной станции отсутствуют. Характеристики качества связи при включении ЛЭП не изменяются.
2. Если принимать во внимание результаты теоретических исследований, то можно утверждать, что взаимное влияние между РРС и ВЛ с ВЧ-связью будет отсутствовать начиная с 7 ГГц.
3. Минимальное расстояние между ВЛ и сайтами РРС в этом случае можно только ограничить минимальным безопасным расстоянием, приведенным в [1].
4. Необходимо внести изменения в ТКП 339-2022 (33240) [1] и ТКП 222-2010 (02140) [2], указав после требований по их территориальному разному, что данные требования распространяются на радиорелейные станции в диапазоне частот 6 ГГц и ниже. Такой подход не препятствует развитию сотовой и другой связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП 339-2022 (33240) «Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний». – Введ. 01.12.11. – Минск: РУП «БЕЛТЭИ», 2011. – 623 с.
2. ТКП 222-2010 (02140) «Радиорелейные линии передачи прямой видимости. Правила проектирования». – Введ. 15.08.2010. – Минск: ОАО «Гипросвязь», 2010. – 30 с.
3. РД 50-723-93 (СИСРП 18-1) «Методические указания. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от воздушных линий электропередачи и высоковольтного оборудования. Описание физических явлений». – Введ. 01.07.1993 – Москва: Издательство стандартов, 1993. – 133 с.
4. CISPRTR 18-1:2017. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 1: Description of phenomena. – Technical report, 2017. – 161 p.
5. Руководящие указания по выбору частот высокочастотных каналов по линиям электропередачи 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ: стандарт организации. СТО 56947007-33.060.40.045-2010. – Введ. 06.05.2010. – Москва: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 232 с.
6. Рекомендация МСЭ-R F.758-7 (11/2019) «Параметры системы и принципы разработки критериев совместного использования частот или совместимости цифровых систем фиксированной беспроводной связи фиксированной службы и систем других служб и других источников помех». – ITU, 2019. – 41 с.

The article presents the main results of a theoretical and experimental study of the mutual influence of air power lines, HF communication equipment over these lines and radio relay terminals in the frequency range above 7 GHz.

Получено 18.05.2023.