

# ПРЕДИСЛОВИЕ

На сегодняшний день в России новые магистральные, внутризоновые и межстанционные линии связи Министерства связи и массовых коммуникаций РФ строятся только с использованием волоконно-оптических кабелей (ВОК). Оптические кабели получили широкое применение также на железнодорожном транспорте и на линиях высокого напряжения. На железных дорогах оптические кабели подвешиваются на опорах контактной сети и автоблокировки, а на линиях высокого напряжения — на опорах ЛЭП. Кроме того, в последние годы в городах и районных центрах достаточно широко стала применяться подвеска оптических кабелей на опорах городского электрохозяйства (опоры трамвайного и троллейбусного транспорта, опоры освещения).

С использованием ВОК развиваются локальные кабельные сети и сети кабельного телевидения, вычислительных, банковских и внутриобъектовых систем. Достаточно широкое применение ВОК находят на сетях широкополосного оптического доступа.

Вместе с тем, несмотря на широкое применение ВОК, на сетях связи России продолжают эксплуатироваться линии связи на основе симметричных и коаксиальных электрических кабелей связи. Эти кабели получили применение на сетях широкополосного абонентского доступа и кабельного телевидения.

За последние годы большое число вузов России открыли подготовку инженерных кадров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и испытывают острую нехватку в обеспечении учебного процесса учебниками и учебными пособиями вообще и по направляющим системам электросвязи (НСЭ) в частности.

Учебник «Направляющие системы электросвязи: теория передачи и влияния, проектирование, строительство и техническая эксплуатация» является первой частью курса по линейным сооружениям связи. Во второй части дана детализация технологий проектирования, строительства и технической эксплуатации наиболее перспективных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Материал учебника соответствует основным требованиям нового Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования, принятого в 2017 году (ГОС-3+ +).

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры линий связи и измерений в технике связи ПГУТИ К.А. Волкову, С.А. Гаврюшину, М.В. Дашкову, Т.Г. Никулиной, К.А. Яблочкину за помощь в подготовке учебника к изданию.

# 1 Современная электрическая связь

---

## 1.1. Классификация и разновидности современных систем связи

На современном этапе развития общества в условиях научно-технического прогресса непрерывно возрастает объем передаваемой информации. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, продукция отрасли связи, выражающаяся в объеме передаваемой информации, возрастает пропорционально квадрату прироста валового продукта. Это определяется необходимостью расширения взаимосвязи между различными звеньями экономики страны, а также увеличением объема информации в технической, научной, политической и культурной жизни общества. Повышаются требования к скорости и качеству передачи разнообразной информации. Связь необходима для оперативного управления экономикой и работы государственных органов, для повышения обороноспособности страны и удовлетворения культурно-бытовых потребностей населения [1].

В эпоху научно-технической революции связь стала составным звеном производственного процесса.

Различают два основных типа направляющих сред: линии передачи в свободном пространстве — радиолинии (РЛ) и направляющие системы электросвязи (НСЭ). Особенностью радиолиний является распространение электромагнитных сигналов в свободном (естественном) пространстве (космос, воздух, земля, вода и т. д.). Дальность РЛ может простирается от нескольких сотен метров, как, например, при первой радиопередаче, осуществленной великим русским ученым А.С. Поповым в 1895 г., до сотен миллионов километров — расстояния между автоматическими космическими аппаратами и земными станциями.

Особенностью НСЭ является то, что распространение сигналов в них от одного абонента (станции, устройства, элемента схемы и т. д.) к другому осуществляется только по специально созданным цепям и трактам, образующим направляющие системы электросвязи, предна-

значенные для передачи электромагнитных сигналов в заданном направлении, с должными качеством и надежностью.

Вышеуказанные особенности РЛ и НСЭ определяют их основные свойства и области применения. Так, РЛ используются для осуществления связи на различные расстояния, часто между абонентами, находящимися в движущемся относительно друг друга состоянии.

Кроме указанных выше достоинств радиолиний, определяемых возможностью установления связи на огромные расстояния с подвижными объектами, отметим еще высокую скорость установления связи, а также возможность обеспечения передачи массовым средствам информации (радиовещание и телевидение) с неограниченным числом слушателей и зрителей.

Основными недостатками РЛ являются: зависимость качества связи от состояния среды передачи и сторонних электромагнитных полей; недостаточно высокая электромагнитная совместимость в диапазоне метровых волн и выше; сложность аппаратуры передатчика и приемника; узкополосность систем передачи, особенно на длинных волнах и выше (отношение  $\Delta F/f_{\text{н}} < 0,1 \dots 0,6$ , где  $\Delta F$  — ширина полосы частот информационного сигнала;  $f_{\text{н}}$  — частота несущей радиосигнала).

С целью уменьшения этих недостатков в ходе развития радиосвязи интенсивно осваивались более высокие частоты (сантиметровые, оптические диапазоны), что позволило резко увеличить абсолютные значения  $\Delta F$ , повысить пропускную способность радиоканалов, создать узконаправленные системы радиосвязи на базе использования направленных антенн и лазерных устройств и привело к резкому уменьшению уровня помех и повышению степени электромагнитной совместимости. Например, линии радиосвязи, работающие на длинных, средних и коротких волнах, позволяют осуществлять связь на большие расстояния, но имеют небольшую пропускную способность и подвержены помехам. Поэтому эти РЛ занимают малый удельный вес в общем объеме электросвязи и используются главным образом для радиофикации и связи с труднодоступными районами.

Радиорелейные линии (РРЛ) работают на дециметровых–миллиметровых волнах в пределах прямой видимости. Они представляют собой цепочку ретрансляторов, устанавливаемых примерно через каждые 50 км (высота мачты 50...70 м). При большей высоте антенной мачты ретрансляционные участки могут быть увеличены до 70...100 км. Эти линии в меньшей степени подвержены помехам, обеспечивают достаточно устойчивую и качественную связь, хотя степень информационной защищенности передачи по ним по сравнению с НСЭ гораздо ниже.

Спутниковые линии (СЛ) используют, как и РРЛ, сантиметровый диапазон волн. Спутниковые линии действуют на принципе ретрансляции сигналов, осуществляемой аппаратурой, расположенной на искусственном спутнике Земли (ИСЗ). Фактически ИСЗ — это ретранслятор радиорелейной линии, поднятый на большую высоту. Спутниковые линии позволяют осуществлять многоканальную связь на очень большие расстояния. На геостационарной орбите высотой 36 000 км спутник вращается со скоростью вращения Земли (один оборот за 24 часа). В этом случае можно с помощью трех спутников, расположенных под углом  $120^\circ$ , обеспечить связь на территории всего земного шара. Спутниковые линии применяются в первую очередь для передачи программ вещания, телевидения в труднодоступные районы Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока. Достоинством СЛ является большая зона действия и передачи информации на значительные расстояния, к недостаткам относятся высокая стоимость запуска спутника и сложность организации дуплексной телефонной связи [2].

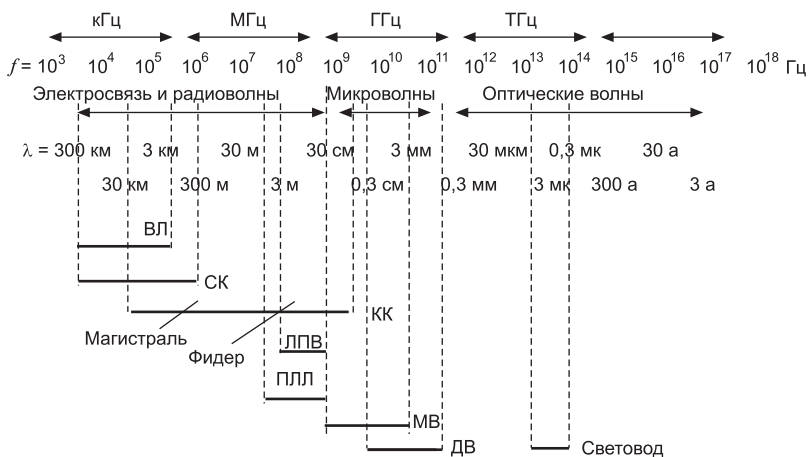
## 1.2. Направляющие системы электросвязи

Непременным и одним из наиболее сложных и дорогостоящих элементов систем связи являются направляющие системы электросвязи (НСЭ), по которым передаются информационные электромагнитные сигналы от одного абонента (станции, передатчика, регенератора и т. д.) к другому (станции, регенератору, приемнику и т. д.) и обратно.

*Направляющая система электросвязи — это устройство, предназначенное для передачи информационных электромагнитных сигналов в заданном направлении.* Таким канализирующим свойством обладают проводник, диэлектрик и любая граница раздела сред с различными электрическими свойствами (металл–диэлектрик, диэлектрик–воздух и др.). Поэтому роль НСЭ могут выполнять металлическая линия (кабель, волновод), диэлектрическая линия из материала с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon > 1$  (диэлектрический волновод, волоконный световод), а также металлодиэлектрическая линия (линия поверхностной волны).

НСЭ могут быть классифицированы в первую очередь по длине волны и частотному диапазону их использования. На рис. 1.1 приведена частотная классификация систем связи. В ней указаны частоты, используемые как для радио, радиорелейных линий и спутниковых линий на основе искусственных спутников Земли, так и для НСЭ различной конструкции.

Из приведенных данных следует, что устаревшие воздушные линии связи использовались в диапазоне до  $10^5$  Гц, симметричные кабели — до  $10^6$  Гц, а коаксиальные кабели — до  $10^9$  Гц.



**Рис. 1.1.** Частотные диапазоны различных систем связи: ВЛ — воздушная линия; СК — симметричный кабель; КК — коаксиальный кабель; ЛПВ — линия поверхностной волны; ПЛЛ — полосковая ленточная линия; МВ — металлический волновод; ДВ — диэлектрический волновод

Появление современных НСЭ, таких как диэлектрические волноводы и оптические кабели (ОК), связаны с освоением новых, более высоких частот миллиметрового и оптического диапазонов. Волноводы предназначены для работы в антенно-фидерных системах на частотах до  $10^{13}$  Гц (миллиметровые волны), а оптические волокна (ОВ) используют частоты  $10^{14} \dots 10^{15}$  Гц (оптический диапазон волн  $0,85 \dots 1,55$  мкм). Осваиваются также волны  $2 \dots 6$  мкм.

РЛ используют диапазон длинных, средних и коротких волн. РРЛ работают на волнах прямой видимости в дециметровом ( $0,3 \dots 3$  ГГц) и сантиметровом ( $3 \dots 30$  ГГц) диапазонах. Очевидно, что чем более высокий диапазон частот можно передать по системе связи, тем больше можно образовать каналов связи и экономичнее передача. Из рис. 1.1 видно, что световоды и волноводы, использующие очень высокие частоты, принципиально позволяют образовывать огромное число каналов. Коаксиальные кабели также пригодны для передачи большого потока информации. Существенно меньше диапазон частот симметричных кабелей, и очень мала пропускная способность воздушных линий связи.

Эффективность работы систем связи во многом предопределяется качеством НСЭ, их свойствами и параметрами, а также зависимостью этих величин от частоты и воздействия различных факторов, включая мешающие влияния сторонних электромагнитных полей [3].

Преимущество НСЭ заключается в обеспечении высокого качества и скорости передачи сигналов, большой защищенности от влияния