

# **ЛЕКЦИЯ 1: «Введение в дисциплину «Направляющие системы телекоммуникаций»**

## **1. Введение:**

- 1.1. Цель и задачи изучения дисциплины связь с другими дисциплинами.**
- 1.2. Объем, структура и содержание дисциплины.**
- 1.3. Список литературы. Контрольные вопросы по темам курса.**

## **2. Направляющие системы телекоммуникаций: основные понятия и определения.**

# 1 Введение

## 1.1. Цель и задачи изучения дисциплины, её связь с другими дисциплинами.

Целью изучения **первой части** дисциплин НС и ЦСП (ТСТК) – «**Направляющие системы и ЦСП**», а также **ТСТК**, является: освоение теоретических **основ** построения и функционирования направляющих систем телекоммуникаций (систем направляющих энергию **электромагнитных волн, несущих информацию** от источника к получателю); приобретение практических навыков измерения и анализа **их характеристик и параметров**; ознакомление с основными **классами**, базовыми **конструкциями**, областями применения и особенностями функционирования направляющих систем **в различных диапазонах частот**.

**Основными задачами** дисциплины являются:

- освоение базовых положений электродинамики направляющих систем;
- изучение теории направляющих структур;
- изучение взаимных влияний и помехозащищенности направляющих систем;
- изучение способов защиты направляющих систем от внешних влияний;
- изучение конструкций и характеристик двухпроводных, коаксиальных, волноводных и волоконно-оптических линий передачи электромагнитных волн;
- овладение основами проектирования и технической эксплуатации линий связи, в которых применяются направляющие системы различного типа;

Для изучения дисциплины - «Направляющие системы телекоммуникаций», **необходимы знания** по следующим дисциплинам: «Физика», «Высшая математика», «Электромагнитные поля и волны», «Теория электрических цепей», «Метрология, стандартизация и сертификация в телекоммуникациях».

## 2. Объем, структура и содержание первой части дисциплин НСиЦСП, НСиТСТК.

Объем первой части дисциплин в учебных часах:

Курс 3, семестр 6: Лекции -18 ч.; ПЗ – 8 ч.; ЛР – 12 ч.; Экзамен.

Всего аудиторных часов для дневной формы обучения 38 ч;

Самостоятельная работа (дневная форма обучения) - 44 ч;

Всего часов по первой части дисциплин - 82 ч.

Структура первой части дисциплин НСиЦСП, НСиТСТК:

### Разделы теории

#### Часть 1. Направляющие системы телекоммуникаций

##### Раздел 1 Теория направляющих систем телекоммуникаций

1.1 Электродинамика направляющих систем

1.2 Теория направляющих структур

##### Раздел 2. Электромагнитные влияния в направляющих системах телекоммуникаций

2.1 Взаимные влияния и помехозащищённость направляющих систем

2.2 Защита направляющих систем от внешних влияний

## Темы практических занятий

**ПЗ - 1.** Изучение конструкций электрических кабелей связи. Расчёт параметров симметричных кабелей. Расчёт параметров коаксиальных кабелей.

**ПЗ – 2.** Расчёт параметров оптических кабелей.

**ПЗ – 3.** Расчёт параметров взаимного влияния для симметричных структур направляющих систем.

**ПЗ – 4.** Расчёт параметров взаимного влияния для несимметричных структур направляющих систем.

## Темы лабораторных занятий

**ЛР - 1.** Исследование влияния неоднородностей в линиях передачи сигналов с помощью прибора Р5-5.

**ЛР - 2.** Исследование собственного и рабочего затухания цепей связи прибором П-321.

**ЛР - 3.** Измерение затухания сигналов в волоконно-оптических кабелях.

**ЛР - 4.** Исследование параметров симметричных линий передачи сигналов прибором ПРО «Альфа».

# Содержание разделов дисциплины НСиЦСП

## Раздел 1. Теория направляющих систем телекоммуникаций

### Тема 1.1. Электродинамика направляющих систем (10 ч.)

- Направляющие системы телекоммуникаций: основные понятия и определения.
- Уравнения электродинамики и режимы передачи.
- Типы электромагнитных волн.
- Теория передачи по линиям связи в квазистационарном режиме. Первичные и вторичные параметры передачи.
- Передача импульсных сигналов по линиям связи.
- Процессы в неоднородных линиях связи. Линии связи с несогласованными нагрузками. Неоднородные линии связи. Обратный и попутный потоки и связанные с ними искажения сигналов. Параметры передачи в неоднородных линиях связи.

### Тема 1.2. Теория направляющих структур (4 ч.)

1. Симметричные кабели. Конструкция, характеристики, расчетные соотношения, область применения.
2. Коаксиальные кабели. Конструкция, характеристики, расчетные соотношения, область применения.
3. Оптические кабели. Конструкция, характеристики, расчетные соотношения, область применения.

## **Раздел 2. Электромагнитные влияния в направляющих системах телекоммуникаций**

### **Тема 2.1. Взаимные влияния и помехозащищённость направляющих систем (2 ч)**

1. Электромагнитная совместимость. Параметры и методы исследования взаимных влияний.
2. Влияния в однородной симметричной цепи. Основное уравнение влияния.
3. Методы защиты цепей и трактов от взаимных влияний.
4. Скрутка, симметрирование НЧ- и ВЧ-кабелей.

### **Тема 2.2. Защита направляющих систем от внешних влияний (2ч)**

1. Источники электромагнитного влияния на линии связи. Классификация внешних влияний (атмосферное электричество, линии электропередачи, электрифицированные железные дороги и пр.).
2. Расчёт опасных электрических и магнитных влияний. Нормы на опасные и мешающие влияния.
3. Аппаратура и способы защиты линейных сооружений связи от внешних влияний. Схемы защиты, разрядники, предохранители, каскадная защита и молниеотводы, редуционные трансформаторы, устройства заземления.
4. Экранирование кабелей связи. Типы экранов. Принципы экранирования в широком диапазоне частот.

## 3. Список литературы

### 3.1 ОСНОВНАЯ

1. Ионов, А. Д. Линии связи / А. Д. Ионов, Б. В. Попов. – М. : Связь, 1990.
2. Гроднев, И. И. Линии связи / И. И. Гроднев, С. М. Верник, Л. Н. Кочановский. – М. : Радио и связь, 1995.
3. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1988.
4. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1992.
5. Михайлов, М. И. Защита кабельных линий от опасных и мешающих влияний / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – М. : Связь, 1978.
6. Грызлов, А. Д. Линейные сооружения ГТС / А. Д. Грызлов, Е. П. Дубровин. – М. : Связь, 1976.
7. Гроднев, И. И. Оптические кабели / И. И. Гроднев, Ю. Т. Ларин, И. И. Теумин. – М. : Энергоиздат, 1991.
8. Барсуков Ф.И., Болошин И.А., Вавилов Н.Ф. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств. Под. общ. ред. А.А. Куликовского. – М: Энергия, 1978.

### 3.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

9. Михайлов, М. И. Защита кабельных линий от опасных и мешающих влияний / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – М. : Связь, 1978.
10. Брискер, А. С. Городские телефонные кабели / А. С. Брискер, А. Д. Руга, Д. Л. Шарле. – М. : Радио и связь, 1984.
11. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М: Наука, 1970.

## Контрольные вопросы по темам курса

1. Основные понятия и определения в области НС (направляющих систем). Сравнение НС и радиолиний. История развития НС.
2. Основные классы НС и их базовые конструкции.
3. Конструкции и частотный диапазон НС, используемых при построении сетей и оборудования связи.
4. Принципы построения сетей связи. Основные требования к НС. Перспективы их развития.
5. Магистральные и зонные сети связи. Первичные и вторичные сети связи.
6. Принципы построения городских телефонных сетей связи.
7. Сети сельской связи и проводного вещания.
8. Основные уравнения электродинамики НС (уравнения Максвелла). Проводники и диэлектрики.
9. Типы и классы электромагнитных волн в направляющих системах передачи.
10. Режимы передачи в НС.
11. Теория передачи по длинным линиям (телеграфные уравнения). Первичные и вторичные параметры передачи.
12. Основные свойства и характеристики неоднородных линий связи.
13. Оценка искажений импульсных сигналов в двухпроводных линиях связи с потерями.
14. Коаксиальные кабели. Электрические процессы в коаксиальных цепях.
15. Коаксиальные кабели. Теория передачи энергии в коаксиальных цепях.
16. Первичные параметры передачи коаксиальных кабелей.

17. Вторичные параметры передачи коаксиальных кабелей. Оптимизация конструктивных размеров.
18. Симметричные кабели. Электрические процессы в симметричных цепях.
19. Симметричные кабели. Теория передачи энергии в симметричных цепях.
20. Первичные параметры передачи симметричных кабелей.
21. Вторичные параметры передачи симметричных кабелей.
22. Особенности определения параметров передачи воздушных линий связи.
23. Классификация и маркировка электрических кабелей связи.
24. Основные типы коаксиальных и симметричных кабелей для организации магистральной и зонной связи.
25. Основные типы коаксиальных и симметричных кабелей для организации местной связи.
26. Металлические волноводы. Основные конструкции, типы волн, частотный диапазон использования.
27. Параметры передачи цилиндрических волноводов.
28. Оптические кабели. Основные типы, маркировка и конструктивные особенности исполнения.
29. Волоконные световоды (ВС) и принцип их действия. Типы ВС. Одно- и многомодовые ВС. Критическая частота и критическая длина волны.
30. Волновая теория передачи по оптическим кабелям.
31. Дисперсия и пропускная способность ВС.
32. Коэффициент распространения, волновое сопротивление и скорость передачи энергии по ВС.

## 2. Направляющие системы телекоммуникаций: основные понятия и определения.

### 2.1. Краткий обзор развития линий связи

Линии связи возникли одновременно с появлением **электрического** телеграфа. **Первые линии связи** были **кабельными**. Однако вследствие несовершенства конструкции самих кабелей подземные кабельные линии связи вскоре **уступили место воздушным**.

Создание первых кабельных линий связано с именем русского ученого П. Л. Шиллинга. Еще в 1812 г. Шиллинг в Петербурге демонстрировал взрывы морских мин, используя для этой цели созданный им изолированный проводник.

В 1851 г. одновременно с постройкой **железной дороги** между Москвой и Петербургом был **проложен телеграфный кабель**, изолированный гуттаперчей (мягкой каучуковой резиной). Первые подводные кабели были проложены в 1852 г. через Северную Двину и в 1879 г. через Каспийское море между Баку и Красноводском.

**Первая воздушная линия** большой протяженности была построена в 1854 г. между Петербургом и Варшавой. В начале 70-х годов девятнадцатого столетия была построена **воздушная телеграфная линия** от Петербурга до Владивостока длиной более **10 тыс. км**. В 1866 г. вступила в строй **кабельная трансатлантическая магистраль** телеграфной связи между Францией и США.

В 1939 г. была пущена в эксплуатацию величайшая в мире по протяженности **высокочастотная телефонная магистраль** Москва - Хабаровск протяженностью 8300 км.

В 1882 - 1884 гг. в Москве, Петрограде, Риге, Одессе были построены **первые в России** городские телефонные сети.

В 90-х годах XIX века на городских телефонных сетях Москвы и Петрограда были **подвешены первые кабели**, насчитывающие до 54 жил, а с 1901 г. началась постройка городских телефонных сетей с использованием **подземных линий передачи**.

Первые конструкции кабелей связи, относящиеся к началу XX века, позволили осуществлять телефонную передачу на небольшие расстояния. Это были **городские телефонные кабели** с воздушно-бумажной изоляцией жил и парной их скруткой.

В 1900 - 1902 гг. была сделана успешная попытка **повысить дальность** передачи **методами пупинизации** - искусственного увеличения индуктивности кабелей путем включения в цепь катушек индуктивности (предложение Пупина), а также применения токопроводящих жил с ферромагнитной обмоткой (предложение Крауфа).

Эти способы позволили увеличить дальность телеграфной и телефонной связи в **несколько раз!**.

Важным этапом в развитии техники связи явилось **изобретение**, а начиная с 1912-1913 г. освоение производства **электронных ламп**.

В 1917 г. В. И. Коваленковым был разработан и испытан на телефонной линии **усилитель на электронных лампах**. В 1923 г. была осуществлена телефонная связь по линиям с усилителями на маршруте Харьков-Москва-Петроград.

В 30-х годах началось развитие **многоканальных систем передачи**. В последующем стремление расширить спектр передаваемых частот и увеличить пропускную способность линий привело к созданию новых типов кабелей, так называемых **коаксиальных**. Они были значительно дороже медных двухпроводных линий, однако их **широкополосность** оказалась востребованной **в многоканальных** системах связи.

**Массовое изготовление** коаксиальных кабелей относится лишь к **1935 г.**, к моменту появления новых высококачественных диэлектриков типа эскапона, высокочастотной керамики, полистирола, стирофлекса и др. Эти кабели допускают передачу энергии при частоте токов до нескольких **сотен мегагерц** и позволяют производить по ним передачу, например, телевизионных программ на большие расстояния.

Первая коаксиальная линия на 240 каналов ВЧ телефонирования была проложена в 1936 г. По первым трансатлантическим подводным кабелям, проложенным в 1856 г., организовывали лишь телеграфную связь, и только через 100 лет, **в 1956 г.**, была сооружена **подводная коаксиальная магистраль между Европой и Америкой** для **многоканальной** телефонной связи.

В 1965-1967 гг. появились опытные **волноводные** линии связи для передачи широкополосных сигналов, а также криогенные сверхпроводящие кабельные линии с весьма малым затуханием для коротких высокоскоростных магистралей.

С 1970 г. в СССР активно развернулись работы по созданию световодов и оптических кабелей, использующих видимое и инфракрасное излучения оптического диапазона волн. Создание **волоконного световода** и получение непрерывной генерации **полупроводникового лазера** сыграли решающую роль в быстром развитии волоконно-оптической связи. К началу 80-х годов XX в. были разработаны и испытаны в реальных условиях **волоконно-оптические системы связи**. Основные сферы применения таких систем: - телефонная сеть; кабельное телевидение; внутриобъектовая связь; вычислительная техника; системы контроля и управления технологическими процессами.

В России, Беларуси и других странах проложены **городские и междугородные волоконно-оптические** линии связи. Они занимают ведущее место в развитии ТКС.

## 2.2. Виды линий связи и их основные свойства

На современном этапе развития общества в условиях научно-технического прогресса непрерывно **возрастает объем информации**. Как показывают теоретические и экспериментальные (статистические) исследования, продукция отрасли связи, которая выражается в объеме передаваемой информации, **возрастает пропорционально квадрату прироста валового продукта** народного хозяйства.

Непременным и одним из наиболее **сложных в эксплуатации** и **дорогостоящих** элементов систем связи являются **линии связи** (ЛС), по которым передаются информационные электромагнитные сигналы **от одного узла сети** (терминала абонента, кросс-шкафа, коммутатора, регенератора и др.) **к другому узлу и в противоположном направлении**. Очевидно, что эффективность работы систем связи во многом предопределяется качеством ЛС, их характеристиками и параметрами, которые зависят от частоты передаваемых сигналов, воздействия различных факторов, включая мешающие влияния сторонних электромагнитных полей.

Различают **два** основных **типа линий передачи** сигналов:

- **беспроводные** линии передачи сигналов в пространстве (радиолинии РЛ);
- **направляющие** системы – **проводные, кабельные, волноводные, оптоволоконные** линии передачи сигналов.

Отличительной особенностью РЛ является **распространение** электромагнитных волн **в свободном** (естественном) **пространстве** (космос, воздух, земля, вода и т. д.).

Дальность РЛ может простираться **от нескольких сотен метров, до сотен миллионов километров**. Такой порядок имеют, например, расстояния между автоматическими аппаратами дальнего космоса и наземными станциями.

Характер распространения электромагнитных сигналов в различных средах в первую очередь зависит от частоты радиосигнала (несущей частоты или средней частоты его спектра).

В соответствии с этим различают следующие типовые диапазоны длин волн и радиочастот ( $C = 300 \times 10^8$  м/с,  $f = C/\lambda$  Гц;  $\lambda = C/f$  м):

|                            |              |                                                 |
|----------------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| Сверхдлинные волны (СДВ)   | 100 ÷ 10 км  | (3 ÷ 30 кГц);                                   |
| Длинные волны (ДВ)         | 10 ÷ 1 км    | (30 ÷ 300 кГц);                                 |
| Средние волны (СВ)         | 1,0 ÷ 0,1 км | (0,3 ÷ 3 МГц);                                  |
| Короткие волны (КВ)        | 100 ÷ 10 м   | (3 ÷ 30 МГц) ;                                  |
| Ультракороткие волны (УКВ) | 10 ÷ 1 м     | (30 ÷ 300 МГц);                                 |
| Дециметровые волны (ДЦМ)   | 1 ÷ 0,1 м    | (0,3 ÷ 3,0 ГГц);                                |
| Сантиметровые волны (СМ)   | 10 ÷ 1 см    | (3 ÷ 30 ГГц)                                    |
| Миллиметровые волны (ММ)   | 10 ÷ 1 мм    | (30 ÷ 300 ГГц)                                  |
| Оптический диапазон        | 10 ÷ 0,1 мкм | ( $3 \times 10^{13}$ ÷ $3 \times 10^{15}$ ) Гц. |

В зависимости от длины волны (частоты несущих колебаний) сигналы в пространстве (по радиопереносам) распространяются следующими путями (Рис. 1):

- ДВ и СВ - поверхностным лучом (1),
- КВ - пространственным лучом (2),
- УКВ и СВ - в пределах прямой видимости (3).

Кроме указанных выше достоинств радиопереносов, определяемых возможностью установления связи на значительных расстояниях с подвижными объектами, отметим еще высокую скорость установления связи, а также возможность широкопередаточной передачи программ средствами массовой информации (радиовещание и телевидение).



Рис. 1. Характер распространения радиоволн различных частот

Основными **недостатками** РЛ (радиолиний) являются:

- **зависимость качества связи** от состояния, среды передачи и сторонних электромагнитных полей;
- недостаточная **электромагнитная совместимость** в диапазоне метровых волн и выше;
- **сложность** аппаратуры передатчика и приемника, особенно в СВЧ диапазоне;
- узкополосность систем передачи на коротких волнах и ниже (отношение  $\Delta F / f_H \leq (0,1 \dots 0,6)$ , где  $\Delta F$  - ширина полосы частот информационного сигнала;  $f_H$  - частота несущей радиосигнала).

**Освоение** СВЧ и оптического диапазонов частот позволило **увеличить абсолютные значения  $\Delta F$** , повысить пропускную способность радиоканалов, создать узконаправленные системы радиосвязи, в частности, радиорелейные линии, на базе

Например, **линии** радиосвязи, работающие **на ДВ, СВ, КВ**, позволяют осуществлять связь на **большие** расстояния, но имеют **низкую** пропускную способность (один-два канала тональной частоты - ТЧ) и сильно **подвержены** помехам. Поэтому эти РЛ занимают малый удельный вес в общем объеме электросвязи и используются главным образом для **радиофикации**, связи между континентами и с труднодоступными районами.

**Радиорелейные** линии (РРЛ) работают в диапазонах **дециметровых, сантиметровых и миллиметровых** волн, которые распространяются прямолинейно - в пределах прямой видимости. Они представляют собой цепочку ретрансляторов, устанавливаемых примерно через каждые 50 км (высота мачты 50 ... 70 м) (Рис. 2). При большей высоте антенной мачты ретрансляционные участки могут быть увеличены до 70... 100 км.

**Радиорелейные** линии позволяют создавать большее число каналов (300...1920) и покрывать большие расстояния (до 12500 км); они получили широкое применение в телевидении, радиофикации и связи. Эти линии (Рис. 2) в меньшей степени подвержены помехам, обеспечивают достаточно устойчивую и качественную связь.

**Спутниковые** линии связи (СЛ) используют, как и РРЛ, сантиметровый и миллиметровый диапазоны длин 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 (Рис. 3а). **Спутниковые линии** позволяют осуществлять многоканальную связь на очень большие расстояния.

На геостационарной орбите высотой  $H = 36000$  км спутник вращается со скоростью вращения Земли (один оборот за 24 часа). В этом случае можно с помощью трех спутников, обеспечить связь на территории всего земного шара (Рис. 3б).

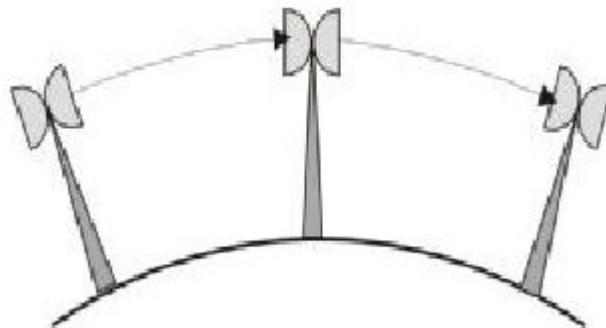


Рис. 2. Расположение ретрансляторов радиорелейной линии

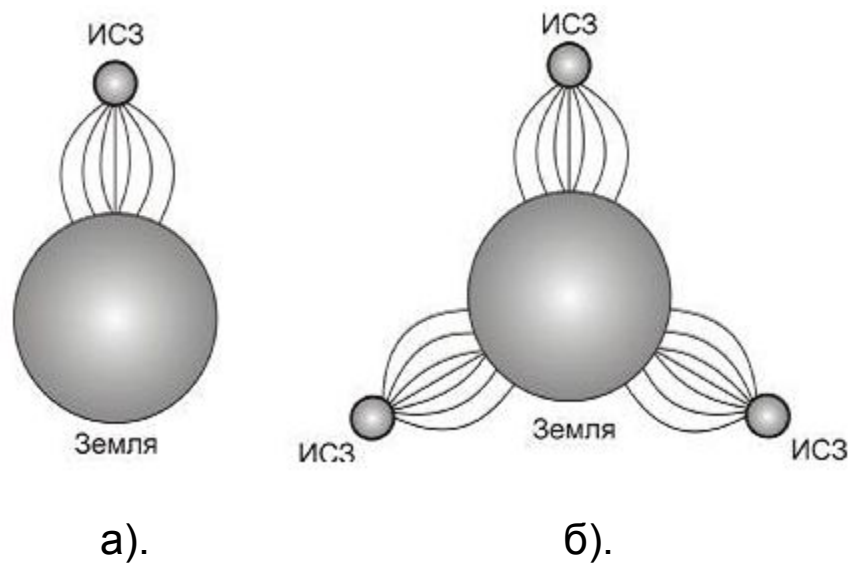


Рис.3. Схема расположения спутников в системах спутниковой связи

Спутниковые линии применяются **в первую очередь** для передачи программ вещания, телевидения и полос газет 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.

Отличительной особенностью **направляющих систем** - линий связи (**ЛС**), является то, что **распространение сигналов** в них от одного абонента (станции, устройства, элемента схемы и т.д.) к другому осуществляется **только по специально созданным электрическим цепям и трактам**, образующим предназначенные для передачи электромагнитных сигналов в заданном направлении с должным качеством и надежностью.

**Достоинства** направляющих систем (**ЛС**) состоят в обеспечении требуемого качества передачи сигналов, высокой скорости передачи, большой защищенности от влияния сторонних полей, хорошей электромагнитной совместимостью, относительной простотой конечных устройств. Недостатки ЛС проявляются как следствие больших капитальных и эксплуатационных расходов, а также относительно длительных сроков развертывания систем связи, ограниченным сроком эксплуатации.

Сравнивая **ЛС и РЛ**, следует отметить, что они **не противопоставляются, а дополняют** друг друга. Примером этого, в частности, является то, что во всех радиопередающих и радиоприемных устройствах для внутренних связей используются проводные, коаксиальные, полосковые волноводные линии, с помощью которых осуществляется передача электромагнитных сигналов между элементами и блоками этих устройств.

В настоящее время по ЛС передаются сигналы в диапазонах от постоянного тока (нулевой частоты) до оптического диапазона, а рабочий диапазон длин волн простирается **от сотен километров до 0,85 мкм**.

Различают **три основных вида линий связи (ЛС)**:

- кабельные (КЛ);
- воздушные (ВЛ);
- волоконно-оптические (ВОЛС).

**Кабельные и воздушные** линии относятся к проводным линиям, у которых направляющие системы образуются системами «проводник-диэлектрик», а волоконно-оптические линии представляют собой **диэлектрические волноводы**, направляющая система которых состоит из диэлектриков с различными показателями преломления.

**Проводные линии** связи работают в килогерцовом и мегагерцовом диапазонах частот. Кабельные линии обеспечивают надежную и помехозащищенную многоканальную связь на требуемые расстояния.

**Коаксиальные** и симметричные кабели получили доминирующее развитие при организации городской и междугородной связи.

Воздушные линии широко использовались в 30÷40-х годах. Однако такие **недостатки**, как: низкая пропускная способность (12 каналов ТЧ; недостаточная защищенность от взаимных помех; подверженность атмосферно-климатическим воздействиям, ограничивают их использование на зонах и сельских сетях связи.

**Волоконно-оптические линии связи** представляют собой системы для передачи световых сигналов микроволнового диапазона волн ( $\lambda = 0,8 \div 1,6$  мкм) по оптическим кабелям. **Этот вид** линий связи рассматривается как **наиболее перспективный**.

Достоинствами ВОЛС являются низкие потери, **большая пропускная способность**, малые масса и габаритные размеры, экономия цветных металлов, высокая степень **защищенности от внешних и взаимных помех**.

## 2.3. Направляющие системы передачи

В настоящее время наряду с широким применением **проводных** линий и **кабелей** получили развитие также другие средства передачи информации, такие как **волноводы**, **световоды**, линии **поверхностной** волны, **сверхпроводящие** и **ленточные** кабели и др.

Все они объединены под общим названием - **направляющие системы**.

**Направляющая система (НС)** - это **устройство**, предназначенное для **передачи** электромагнитной **энергии** 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 НС могут выполнять металлическая линия (кабель, волновод), диэлектрическая линия из материала с  $\epsilon > 1$  (диэлектрический волновод, волоконный световод), а также металлодиэлектрическая линия (линия поверхностной волны).

**Современные направляющие системы** подразделяются на:

- воздушные линии связи (ВЛС);
- симметричные кабели (СК), коаксиальные кабели (КК);
- сверхпроводящие кабели (СПК);
- волноводы (В);
- световоды (С), оптические кабели (ОК); линии поверхностной волны (ЛПВ), диэлектрические волноводы (ДВ);
- ленточные кабели (ЛК), (полосковые линии ПЛ);
- радиочастотные кабели (РК).

Конструкции различных направляющих систем схематично показаны на рисунке (Рис.4).

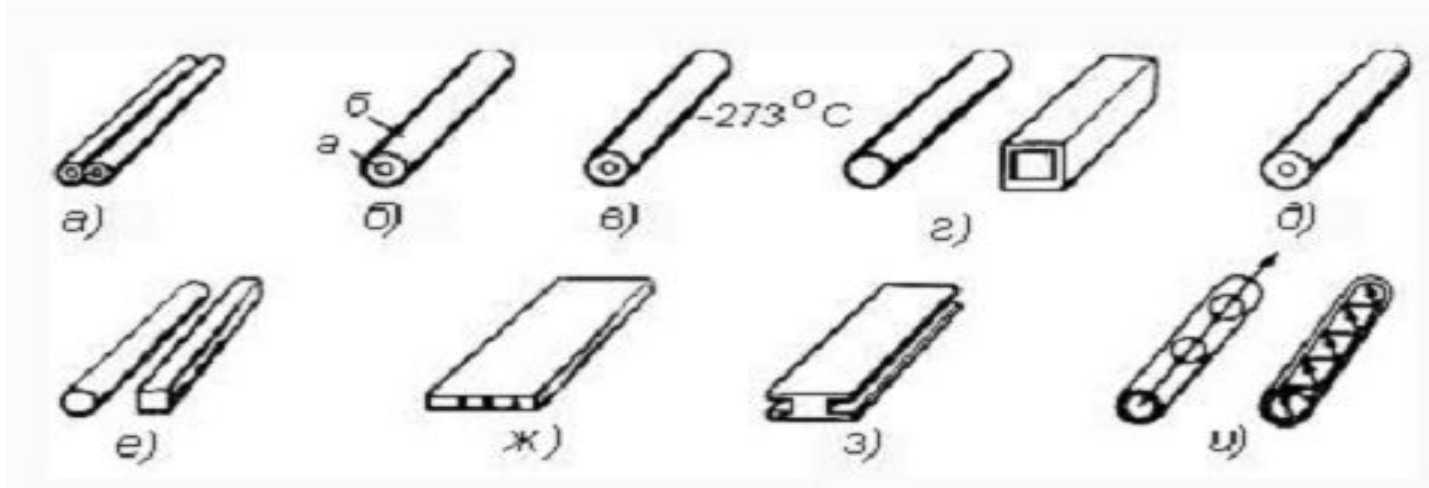


Рис. 4. Конструкции направляющих систем

1. **Воздушные** линии и **симметричные кабели** относятся к группе симметричных цепей (Рис. 4а). Отличительной особенностью таких цепей является наличие **двух проводников** (жил) **с одинаковыми** конструктивными и электрическими свойствами. Известные конструкции симметричных кабелей содержат от 1х2 до 2400х2 жил под общей защитной оболочкой.
2. В **коаксиальном** кабеле (Рис. 4б) проводник «а» **концентрически** расположен внутри проводника «б», имеющего форму **полого цилиндра**. Внутренний проводник изолируется от внешнего с помощью различных изоляционных прокладок (шайбы, баллоны, кордели и др.).
3. **Сверхпроводящий** кабель (Рис. 4в) имеет **коаксиальную** конструкцию весьма малых габаритных размеров, помещенную в условия низких отрицательных температур ( $-269^{\circ}\text{C}$ ).
4. **Волновод** (Рис. 4г) представляет собой **полую металлическую трубку** круглого или прямоугольного сечения, изготовленную из хорошо проводящего материала.

5. **Линия поверхностной волны** (Рис. 4д) представляет собой **одиночный** металлический провод, покрытый высокочастотной изоляцией (полиэтиленом).

6. **Диэлектрический волновод (ДВ)** (Рис.4е) - это **стержень** круглого или прямоугольного сечения, выполненный из высокочастотного материала (полиэтилена, стирофлекса).

7. **Полосковая линия (ПЛ)** (Рис. 4ж) состоит из **плоских ленточных** проводников с расположенной между ними изоляцией.

8. **Ленточный кабель** (Рис. 4з) содержит большое число проводников, расположенных в одной плоскости, широко применяются в ПВМ.

**Оптический кабель** (Рис. 4и) представляет собой **скрутку** из оптических волокон - **световодов**, объединенных в единую конструкцию.

9. **Радиочастотный кабель (РК)** (Рис.4б,в) - имеет **коаксиальную, симметричную** или **спиральную** конструкцию.

Три типа направляющих систем -  $D_{изл} V_{олн}$ ;  $P_{ол} L_{лин}$ ;  $P_{ад} K_{аб}$  имеют локальное назначение и используются в качестве фидеров передачи энергии на короткие расстояния **от антенн к аппаратуре**.

**Линия поверхностной волны** предназначена главным образом для устройства телевизионных ответвлений от магистральных кабельных и радиорелейных линий небольшой протяженности (до 100 м).

Остальные направляющие системы применяются для организации **магистральной высокочастотной связи на большие расстояния** для передачи различных видов современной информации (телефонирование, телеграфирование, телевидение, передача данных, вещание, фототелеграфирование, передача газет и др.).

На рисунке (Рис. 5) указаны **частотные диапазоны различных НС**. Из приведенных данных следует, что воздушные линии (ВЛ) используются в диапазоне до  $10^5$  Гц,

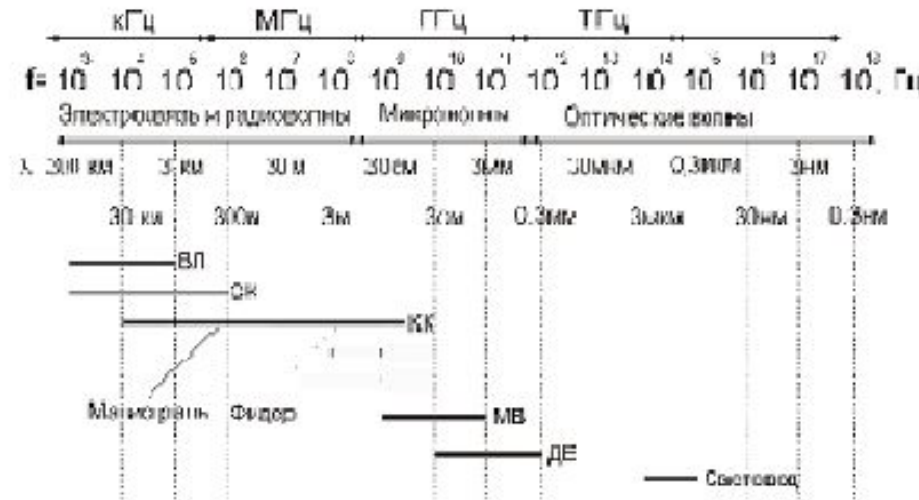


Рис. 5. Частотные диапазоны различных направляющих систем:

ВЛ - воздушная линия; СК - симметричный кабель; КК - коаксиальный кабель;

МВ - металлический волновод; ДВ - диэлектрический волновод.

Появление и разработка новых НС передачи, таких как **волноводы и световоды (ОК)**, связаны с освоением новых, более высоких частот миллиметрового и оптического диапазонов. Волноводы междугородной связи предназначены для работы на частотах до  $10^{11}$  Гц (миллиметровые волны), а световоды используют частоты  $10^{14}$  Гц (оптический диапазон волн  $0,85 \div 1,55$  мкм). Осваиваются также волны  $2 \div 6$  мкм.

**Радиолинии** используют диапазон длинных, средних и коротких волн.

**Радиорелейные линии связи** работают на волнах прямой видимости в дециметровом ( $0,3 \div 3$  ГГц) и сантиметровом ( $3 \div 30$  ГГц) диапазонах.

Естественно, что чем более широкий диапазон частот можно передать по НС, тем **больше можно образовать каналов связи** и экономичнее передавать сообщения.

Это наглядно иллюстрируется данными, приведенными в таблице 1, где указано число каналов (стандартных каналов ТЧ!) организуемых с помощью различных НС.

Из этой таблицы видно, что **световоды и волноводы**, использующие сверхвысокие частоты, принципиально позволяют образовывать **очень большое число каналов**.

**Коаксиальные кабели** также пригодны для передачи большого потока информации.

Существенно меньшие диапазон частот **симметричных кабелей**, и очень мала пропускная способность **воздушных** линий связи.

Таблица 1

| Направляющая система | Частота, Гц  | Длина волны | Возможное число телефонных каналов | Существующая система связи  |
|----------------------|--------------|-------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Воздушные линии      | $10^5$       | км          | 10                                 | В-12                        |
| Симметричный кабель  | $10^6$       | 100 м       | 100                                | К-60, К-1020                |
| Коаксиальный кабель  | $10^8$       | м           | 1000...10000                       | К-1920, К-3600,             |
| Волновод             | $10^{10-11}$ | мм          | 100000                             | К-10800                     |
| Световод (ОК)        | $10^{14-15}$ | мкм         | 100000                             | ИКМ-480, ИКМ-1920, ИКМ-7680 |

# 1. Уравнения электродинамики

## 1.1. Детерминированные сигналы.

Несмотря на то, что **детерминированные сигналы** сами по себе **информацию не несут**, они широко используются в качестве **эталонных** сигналов для оценки качества и состояния объектов исследования.

**Известное поведение** сигналов на входе исследуемых устройств и систем, **известные значения их параметров и характеристик** позволяют, **путем сравнения** с поведением и параметрами процессов **на выходе**, извлекать информацию о состоянии среды (устройств и систем), в которой они распространяются.

В частности, из совокупности детерминированных сигналов можно сформировать модель случайного процесса, если значения параметров гармонических сигналов задавать случайным образом и множество таких сигналов просуммировать.

Одним из наиболее распространенных носителей информации являются **детерминированные гармонические сигналы** и **детерминированные периодические импульсные последовательности**.

На рисунке (Рис.2.1) представлен графически фрагмент гармонического сигнала, как функции времени, а также в виде вращающегося вектора

$$\vec{U}(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_0)$$

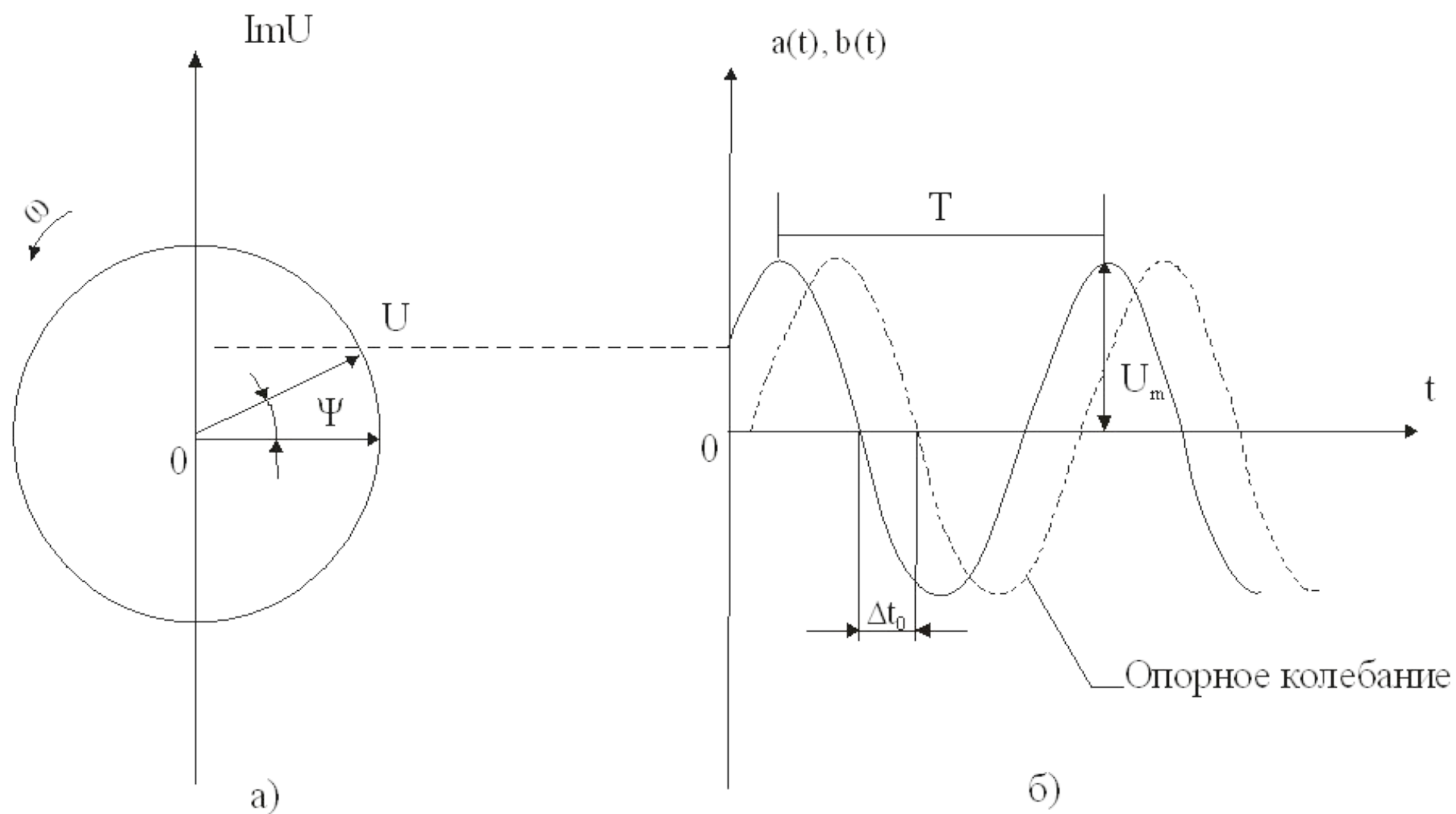


Рис. 2.1. Графическое представление гармонического сигнала

Здесь  $U_m$  - амплитуда,  $\omega$  - круговая частота,  $\psi_0 = 2\pi t_0/T$  - начальная фаза,  $T$  - период колебания,  $\nu$  - частота колебания.

**Мгновенной фазой** процесса называется его **состояние в данный момент времени**.

Для гармонического сигнала мгновенная фаза (состояние) – это его значение в любой момент времени  $t$ . Если выбрать момент времени  $t_0$ , то состояние процесса при постоянной амплитуде определяется величиной  $\psi_0$  где  $\psi_0$  называется **начальным фазовым углом** или просто **начальной фазой**, в то время как **мгновенная** (текущая) **фаза процесса**  $\hat{O}(t) = \omega t + \psi_0$ .

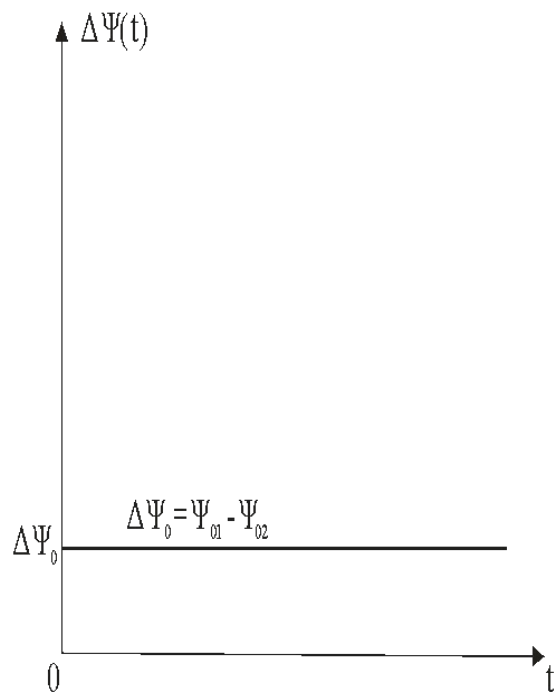
Сопоставляя текущие состояния различных гармонических процессов, в частности двух, можно говорить о **разности их фаз**.

Если они имеют **одинаковые частоты**  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , то разность фаз с течением времени не изменяется (Рис.2.2 а)  $\Delta\psi = \omega_1(t) + \psi_{01} - (\omega_2(t) + \psi_{02}) = \psi_{01} - \psi_{02}$

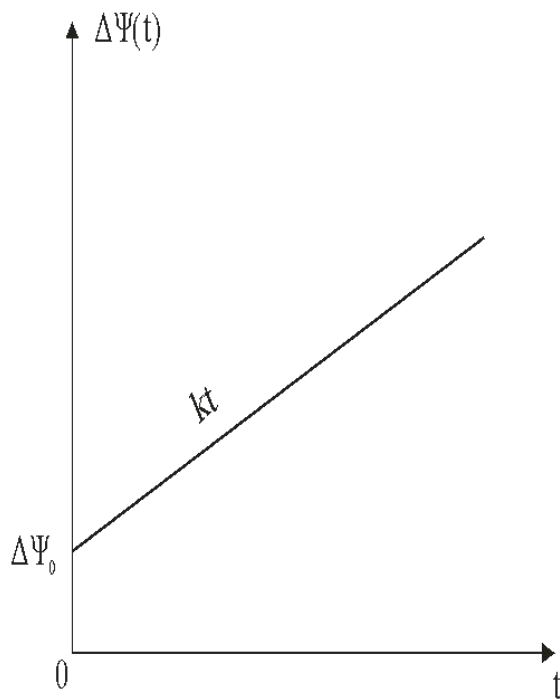
Если частоты колебаний **различны, но постоянны во времени**, то разность фаз  $\Delta\psi(t) = kt + \Delta\psi$  изменяется линейно, а  $k = \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ . (Рис.2.2 б).

В общем случае **разность фаз** гармонических сигналов определяется интегральной зависимостью  $\Delta\psi(t) = \Delta\psi_0 + \int ((\omega_1(\tau) - \omega_2(\tau))d\tau$ . В частности, если **разность частот** изменяется линейно  $\Delta\omega(t) = \nu t$ , где  $\nu$  - разность скоростей изменения частот, то разность фаз будет изменяться по квадратичному закону

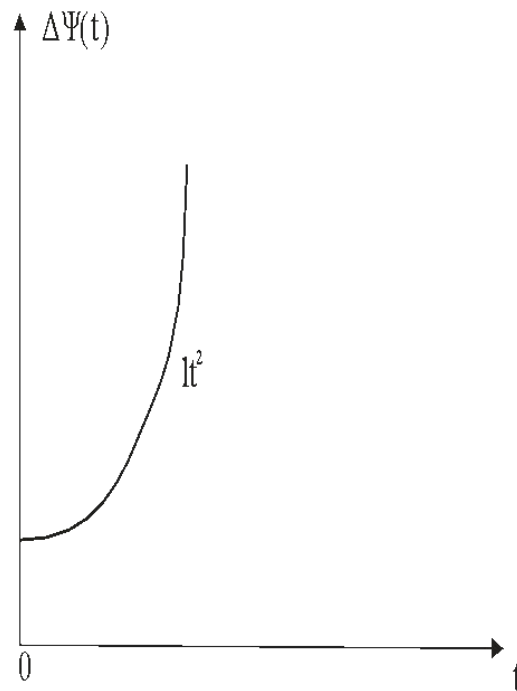
$$\Delta\psi(t) = \Delta\psi_0 + \int \nu t dt = \Delta\psi_0 + \frac{\nu}{2} t^2 \quad (\text{Рис.2.2 б}).$$



a).



б).



с).

Рис. 2.2. Зависимости изменения во времени разности фаз двух колебаний:

а) – при равенстве частот; б) – при постоянной разности частот;

с) – при постоянной скорости изменения разности частот.

**Высшие гармоники** – это гармонические колебания, частоты которых  $\omega_n = n \omega_1$  в целое число раз превышают частоту исходного (основного, опорного) колебания, получившего название **первой** гармоники, а частоты **субгармоник** определяются соотношением  $\omega_{nN} = \omega_1 / n$

**Гармонический** сигнал  $U(t) = U_m \sin(\omega_1 t + \psi_0)$  можно представить в виде **вращающегося вектора** (Рис.2.3.), который имеет две проекции на оси и прямоугольной системы координат

$U(t) = x(t) + y(t) = a_1 \cos \omega_1 t + b_1 \sin \omega_1 t$ , где  $a_1 = U_m \sin \psi_0$  и  $b_1 = U_m \cos \psi_0$  получены из разложения сигнала на основании тождества  $\sin(\alpha + \beta) = \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta$ .

Из этого разложения следует, что  $U(t)$  можно представить **двумя гармониками той же частоты** с амплитудами  $a_1$  и  $b_1$ , сдвинутыми по фазе на  $\psi_0$ .

Коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  можно определить **другим способом**, умножив  $U(t)$  поочередно на  $\cos \omega_1 t$  и проинтегрировав на интервале  $[-T/2, T/2]$ .

$$\int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cos \omega_1 t dt = U_m \int_{-T/2}^{T/2} (\cos \omega_1 t \sin \psi_0) \cos \omega_1 t dt + U_m \int_{-T/2}^{T/2} (\sin \omega_1 t \cos \psi_0) \cos \omega_1 t dt \quad (2)$$

Вычислим значение **первого определенного интеграла** суммы (2)

$$U_m \sin \psi_0 \int_{-T/2}^{T/2} (\cos^2 \omega_1 t) dt = U_m \sin \psi_0 \int_{-T/2}^{T/2} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega_1 t) dt =$$

$$= \frac{U_m \sin \psi_0}{2} t \Big|_{-T/2}^{T/2} + \left( \frac{U_m \sin \psi_0}{2} \right) \frac{-1}{2\omega_1} \sin 2\omega_1 t \Big|_{-T/2}^{T/2} = U_m \sin \psi_0 \frac{T}{2} - 0 = a_1 \frac{T}{2}$$

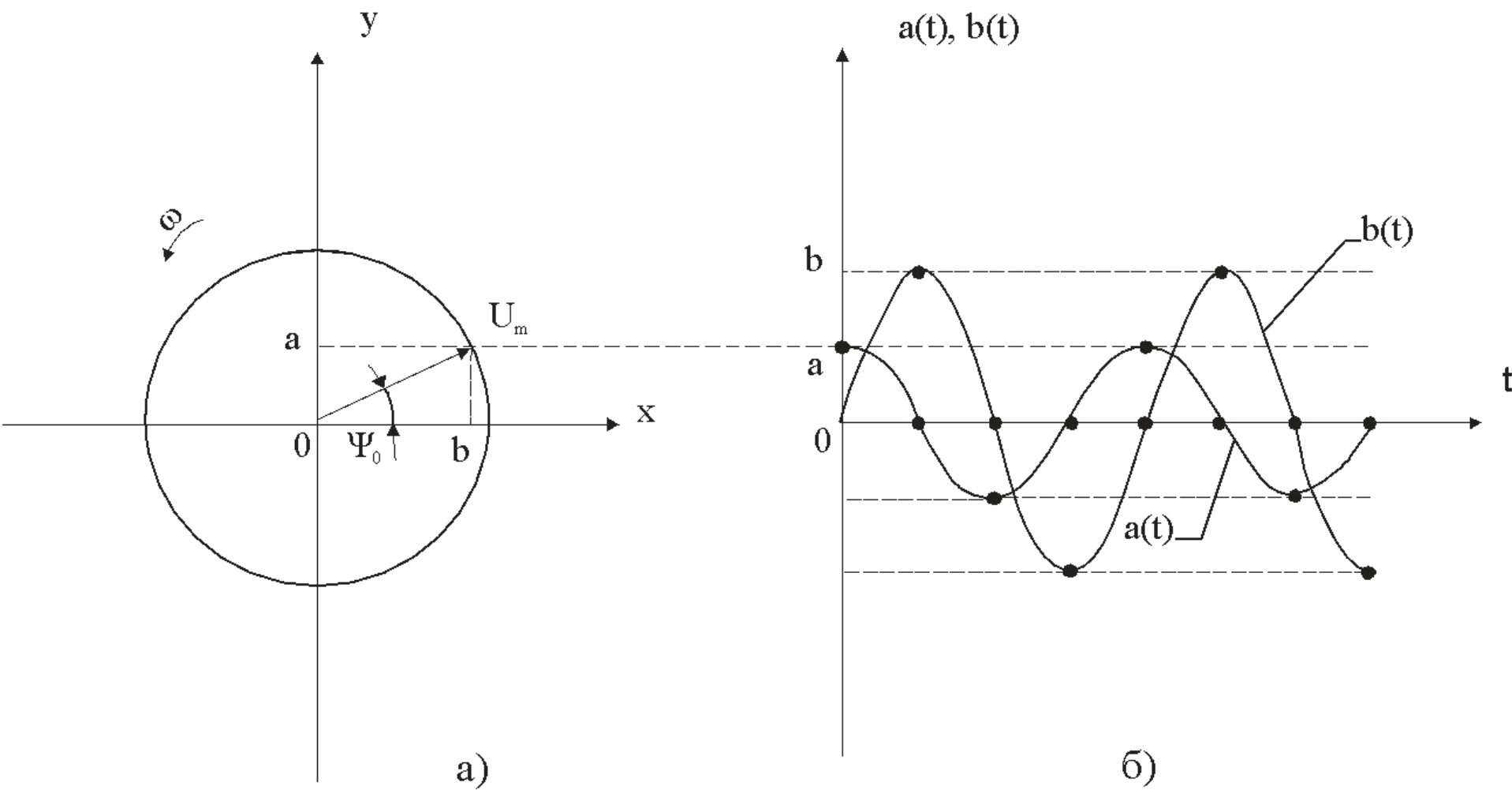


Рис. 2.3. Представление гармонического сигнала рядом Фурье

Значение второго интеграла суммы (2) равно нулю. Следовательно, значение коэффициента вычисляется по формуле

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cos \omega_1 t dt$$

Умножив на и выполнив вычисления аналогичным способом, получим формулу для определения коэффициента

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \sin \omega_1 t dt$$

Если любой периодический сигнал  $U(t)$  поочередно умножать на  $\cos \omega_1 t$  и  $\sin \omega_1 t$ , а затем интегрировать на интервале  $[-T/2, T/2]$ , то можно вычислить коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$ , для высших гармоник.

Такая возможность обусловлена тем, что система тригонометрических функций

ортogonalна и характеризуется выполнением следующих равенств:

$$\int_{-T/2}^{T/2} \cos m \omega t \sin n \omega t dt = 0 \qquad n = 1, 2, 3, \dots, m = 1, 2, 3, \dots$$

и при любых

Из рассмотренного представления следует, что периодический сигнал, в данном случае гармонический, можно разложить на гармонические составляющие

$$\cos n \omega_1 t \text{ и } \sin n \omega_1 t \text{ при } n = 1$$

Обобщая этот результат на другие **не гармонические периодические сигналы** повторяющиеся с периодом  $T$ , можно утверждать, что и они представимы **в виде суммы** составляющих тригонометрического ряда

$$U(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega_1 t + b_n \sin n \omega_1 t) \quad (3)$$

где  $a_n$  и  $b_n$  - коэффициенты ряда (ряда Фурье),  $n \omega_1 = n \frac{2\pi}{T}$  - гармонические частоты **гармонических составляющих** ряда. Постоянная составляющая с коэффициентом может условно считаться гармоникой с частотой  $\omega_1$ . Ее величина определяется как среднее значение сигнала по формуле

(4)

В свою очередь, амплитуды  $a_n$  и  $b_n$  -ых гармоник разложения находятся по формулам

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cos n \frac{2\pi}{T} t dt \quad (5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \sin n \frac{2\pi}{T} t dt \quad (6)$$

Наиболее удобным для анализа прохождения гармонического сигнала по электрическим цепям является его представление в комплексной форме.

Это возможно, если сигнал представить в виде вращающегося вектора на комплексной плоскости, разложенного на две гармонические составляющие.

Пусть комплексный сигнал  $U(t) = y(t) = \cos \omega t + j \sin \omega t$  где для простоты дальнейших преобразований считаем  $T = 2\pi$  и  $\omega t = (2\pi / T)t = t$ .

Найдем производную комплексной функции по переменной

$$\frac{dU(t)}{dt} = -\sin t + j \cos t = j(\cos t + j \sin t) = jU(t)$$

на основании чего можно записать и разрешить относительно дифференциальное уравнение с разделяющимися

переменными в виде 
$$\frac{dU(t)}{U(t)} = j dt$$

Для определения значения постоянной интегрирования вычислим значение функции Следовательно  $U(0) = \cos 0 + j \sin 0 = 1$  , и окончательно  $U(t) = e^{jt} + C$   $C = 0$  , откуда

, а

Два последних выражения называются формулами Эйлера.

Из этих выражений следует, что

$$\cos t = \frac{e^{jt} + e^{-jt}}{2} \quad \sin t = \frac{e^{jt} - e^{-jt}}{2j}$$

Окончательно гармонический сигнал (1) можно записать в комплексной форме , или с учетом замены в правой части переменной в выражении

$$U(t) = y(t) = \cos \omega t + j \sin \omega t = U_m e^{j\omega t} \quad U_m = 1$$

В окончательном виде получим представление гармонического сигнала в комплексной форме

## 2. Основное уравнение кабельной линии

**Качество** передачи по кабельным **направляющим системам** и их электрические свойства полностью **характеризуются первичными параметрами**. По физической природе **параметры** линий связи (**цепей**) аналогичны **параметрам колебательных контуров**, составленных из элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Разница состоит лишь в том, что в контурах эти параметры являются сосредоточенными, а в цепях связи они **распределены** по всей длине линий.

Параметры  $R$  и  $L$ , включенные **последовательно** (продольные), образуют суммарное комплексное сопротивление  $Z = R + i\omega L$ , а параметры  $G$  и  $C$  (поперечные) - суммарную комплексную проводимость  $Y = G + i\omega C$ .

Из указанных четырех параметров лишь  **$R$  и  $G$**  обуславливают **потери энергии**: первый - **тепловые потери** в проводах и других металлических частях кабеля (экран, оболочка, броня); второй - **потери в изоляции**.

**Однородная** кабельная линия (цепь), эквивалентная электрическая схема которой приведена на рисунке (Рис.1), определяется **первичными** электрическими параметрами **-погонными** значениями **на единицу длины** линии, как правило, **на 1 км**:

- активного сопротивления  $R$ ;
- индуктивности  $L$ ;
- емкости  $C$  ;
- проводимости  $G$

В нашем рассмотрении на вход линии передачи (Рис.1) подключается источник сигналов (генератор, передатчик) с выходным сопротивлением  $Z_0$ , на выходе линии включен приемник сигналов с входным сопротивлением  $Z_H$  (нагрузка линии).

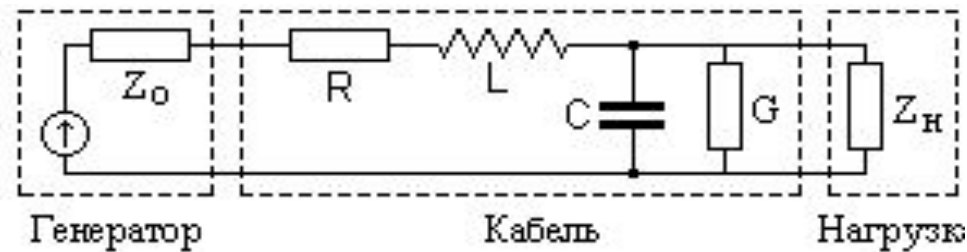


Рис.1. Кабельная линия передачи сигналов

Поскольку первичные электрические **параметры кабеля** аналогичны **параметрам колебательных контуров**, то физические процессы, протекающие в них аналогичны. Этим объясняется **зависимость** первичных параметров кабеля **от частоты** сигнала и от **конструкции кабеля**.

При определении передаточных функций линий связи **сигнал** на входе линии задается **в комплексной форме** в виде **временной** функции напряжения и тока .

На выходе линии (на нагрузке) соответственно имеем  $\dot{U}_H$  и  $I_H$ . Падение напряжения и утечка тока на произвольном участке  $dx$  линии определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} -d/dx &= (R + j\omega L), \\ -d/dx &= (G + j\omega C). \end{aligned}$$

Решение данных уравнений для напряжения и тока в произвольной точке  $x$  линии дает следующие выражения:



