

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЭП НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ

КУЛИКОВ А.Л., канд. техн. наук, МИСРИХАНОВ М.Ш., д-р техн. наук, КУДРЯВЦЕВ Д.М., инж.

Рассматриваются частотно-временные методы ОМП на ЛЭП, основанные на контроле распространения многочастотного сигнала и имеющие локационный характер (основанные на измерении времени запаздывания сигнала).

Ключевые слова: линии электропередачи, диагностика, импульсный метод, волновой метод, волновые колебания, частотно-временной метод.

MAIN TRANSMISSION LINE DIAGNOSTICS ON TIME-AND-FREQUENCY METHODS BASE

A.L. KULIKOV, Ph.D., M.Sh. MISRIKHANOV, Ph.D., D.M. KUDRYAVTSEV, engineer

This paper is devoted to the time-and-frequency methods on TL (transmission lines), which are based in multiple frequency signal transmission control. These methods have location character as they are based on signal time delay measurement.

Key words: transmission lines, diagnostics, pulse method, wave method, wave fluctuation, time-and-frequency method.

При классификации методов определения места повреждения (ОМП) на ЛЭП за основу, как правило, берутся либо базовые физические принципы ОМП (например, импульсные методы, волновые методы, метод стоячих волн, использующие параметры аварийного режима (ПАР), и др.), либо их частотные характеристики (высокочастотные, среднечастотные, низкочастотные методы) [1, 2]. Эти методы, в основном, ориентированы на ОМП кабельных линий, передающих видео- или радиосигналы, однако могут применяться и для диагностики воздушных ЛЭП.

Основу импульсных и волновых методов составляет локационный принцип, базирующийся на измерении времени запаздывания распространяющегося импульсного сигнала. При этом сигнал может быть получен искусственным путем (активная локация) с помощью генератора зондирующих импульсов, подключенного к ЛЭП (импульсные методы), или возникать самостоятельно (пассивная локация) при наличии короткого замыкания (КЗ) на ЛЭП (волновые методы).

Основу частотных методов [3] и метода стоячих волн [1, 2] составляет измерение частоты электромагнитных колебаний. По аналогии измерение в этих методах может осуществляться активно, когда к ЛЭП подключается перестраиваемый генератор синусоидальных колебаний (метод стоячих волн), либо пассивно, когда измеряется частота свободных колебательных составляющих, возникающих в линии при коротких замыканиях. Следует заметить, что физическая основа частотного метода и волновых методов односторонних измерений практически одна и та же. Отличие составляет характер измерений: частотные либо временные (например, период колебаний свободных составляющих).

Физическую основу частотно-временных методов составляют принципы, предложенные в 40–50-х годах прошлого столетия и реализованные в ряде изобретений [4–7]. Типовым представителем и пионерским техническим решением рассматриваемой группы методов является устройство [4], реализующее частотно-временной метод ОМП. Заметим, что схемное решение устройства (рис. 1)

позволяет лишь уяснить физические принципы метода, но не является законченным и технически реализуемым.

Источники непрерывных синусоидальных колебаний с частотой f_1 и f_2 включены в линию и передают гармонические сигналы в обозначенном направлении (здесь и далее не указываются элементы присоединения к ЛЭП). В дальней точке эти гармонические колебания селективируются, усиливаются и выпрямляются, а результирующее напряжение подается на соответствующее реле.

При отсутствии повреждений любой природы, являющихся причиной прерываний в передаче ЛЭП, реле находится в рабочем состоянии. Это означает, что токи от источников через контакты реле и фиксирующее устройство протекают на землю. Фиксирующее устройство находится в нерабочем состоянии.

При возникновении прерываний волновые колебания с частотой f_1 и f_2 прерываются в точке приема со временем, зависящим от условий распространения для каждой из частот. Такие прерывания приводят к срабатыванию реле в каналах частот f_1 и f_2 и регистрации разности времени распространения колебаний с частотой f_1 и f_2 фиксирующим устройством.

Временная задержка в колебаниях с частотой f_1 и f_2 может быть использована для ОМП. Известно, что скорость распространения гармонических колебаний на различных частотах зависит от состояния и параметров ЛЭП, и поэтому с помощью скорости распространения колебаний на различных частотах можно характеризовать индивидуальные особенности и состояние линии, например, зависимость задержки для разных частот (рис. 2).

Если колебания с частотой f_1 и f_2 прилагаются к начальной точке ЛЭП, имеющей длину L , то разница во времени прихода волн в дальней точке составляет

$$y - Z = t$$

где Z – время прихода волны с частотой f_1 ; y – время прихода волны с частотой f_2 ; t – разность времен.

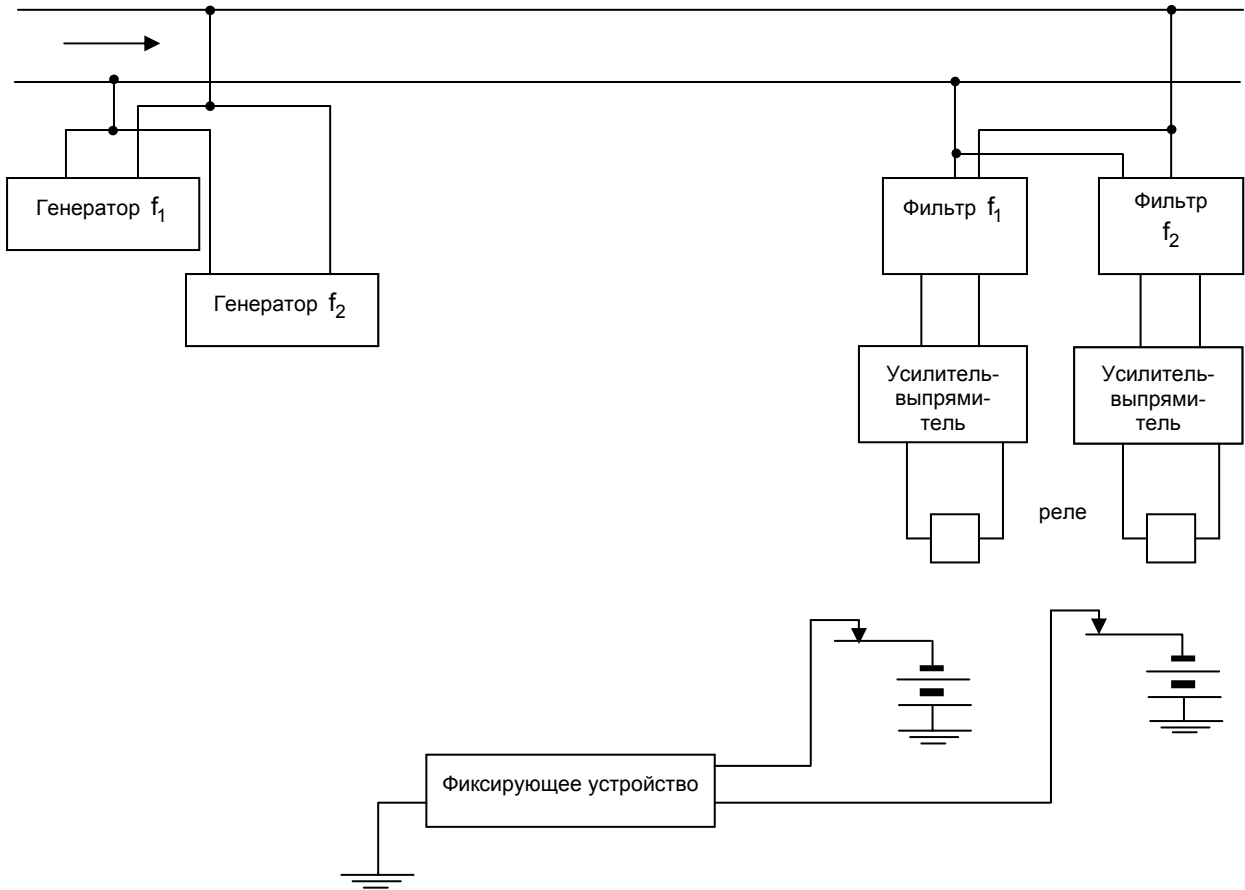


Рис. 1. Структурная схема устройства, реализующего частотно-временной метод ОМП

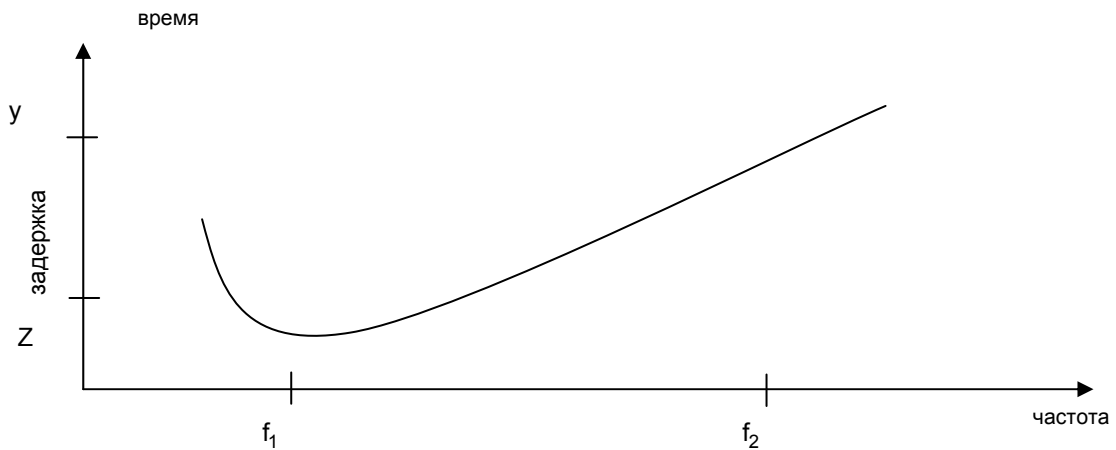


Рис. 2. Зависимость задержки времени распространения от частоты

Если колебания с частотой f_1 и f_2 прерываются в неизвестной точке X , лежащей между концами линии длиной L , то волна с частотой f_1 имеет большую скорость распространения и поэтому будет принята первой на конце линии. Волна с частотой f_2 придет второй. Соответствующая разница времен составляет $y' - Z' = t'$.

Соответственно, длина линии пропорциональна разности времен прихода волн с частотами f_1 и f_2 , т. е. L пропорциональна t' , а расстояние до точки X пропорционально t' . После деления этих соотношений получим

$$\frac{L}{X} = \frac{t}{t'}$$

из этого следует

$$X = \frac{L \cdot t'}{t}$$

Таким образом, место повреждения, причиной которого становятся прерывания, можно определить, зная длину ЛЭП L и, соответственно, временные запаздывания t' и t .

Другая группа частотно-временных методов [6, 7] использует специфику изменения скорости распространения волн при повреждении изоляции

ЛЭП и других ее особенностей, связанных с возникновением нелинейной характеристики на одном из её участков. Возможно возникновение на этих участках кратных и междоуляционных частот, связанных с частотами оригинальных волновых колебаний.

Так, в одной из работ [7] предлагается следующий метод и устройство ОМП (рис. 3). Пусть несущая частота одного из колебаний равна f_1 и соответствующая скорость распространения – V_1 , а для второго колебания – f_2 и V_2 , соответственно. Пусть X – расстояние от нерегулярности ЛЭП до точки приема. Тогда время распространения колебания с частотой f_1 до точки приема

$$t_1 = \frac{X}{V_1}$$

а соответствующее время распространения для колебаний с частотой f_2

$$t_2 = \frac{X}{V_2}$$

Скорости V_1 и V_2 принимаются неизменяющимися по всей длине L .

Расстояние до места повреждения, зависящее от регистрируемой разности времен, может быть рассчитано в соответствии с формулой

$$X = (t_1 - t_2) \frac{V_1 V_2}{V_2 - V_1}$$

Работа устройства (рис. 3), реализующего такой способ ОМП, состоит в следующем. Источник колебаний – генератор частоты f_1 – подключается к линии через модулятор и фильтр. Он посылает в линию колебания с частотой $f_1 \pm m$, где m – низкая частота. Второй генератор формирует

частоты $f_2 \pm f_1$ (f_2 – частота, отличная от f_1), которые, проходя через фильтр, направляются в линию. Вспомогательный источник генерирует колебания низких частот m , которые могут быть подключены через контакты выключателя к модулятору.

Электромагнитные волны от генератора $f_1 \pm m$, прошедшие через соответствующий фильтр и ЛЭП, выделяются фильтром с другой стороны линии, демодулируются колебаниями частоты f_1 , а также регистрируются блоком записи. При возникновении нелинейностей и нерегулярностей в линии происходит образование комбинационных частот колебаний $f_2 - f_1$ и $f_1 \pm m$. Одним из продуктов интермодуляции являются колебания с частотой $f_2 - f_1 + f_1 \pm m = f_2 \pm m$. Эти частоты выделяются фильтром $f_2 \pm m$, а затем демодулируются с использованием генератора частоты f_2 и регистрируются блоком записи.

Перед началом работы (или в процессе работы) прибора производится тестирование. При этом замыкаются контакты выключателей (рис. 3), обеспечивая подачу колебаний в линию только частот $f_1 \pm m$. В нормальном режиме работы контакты выключателей разомкнуты.

Временные диаграммы (рис. 4) отображают типовую регистрацию колебаний с несущими частотами f_1 и f_2 , а также регистрацию колебаний частоты синхронизации. Таким образом, разница между моментами регистрации $t_2 - t_1$ в этом случае (рис. 4) определяет расстояние X до места повреждения.

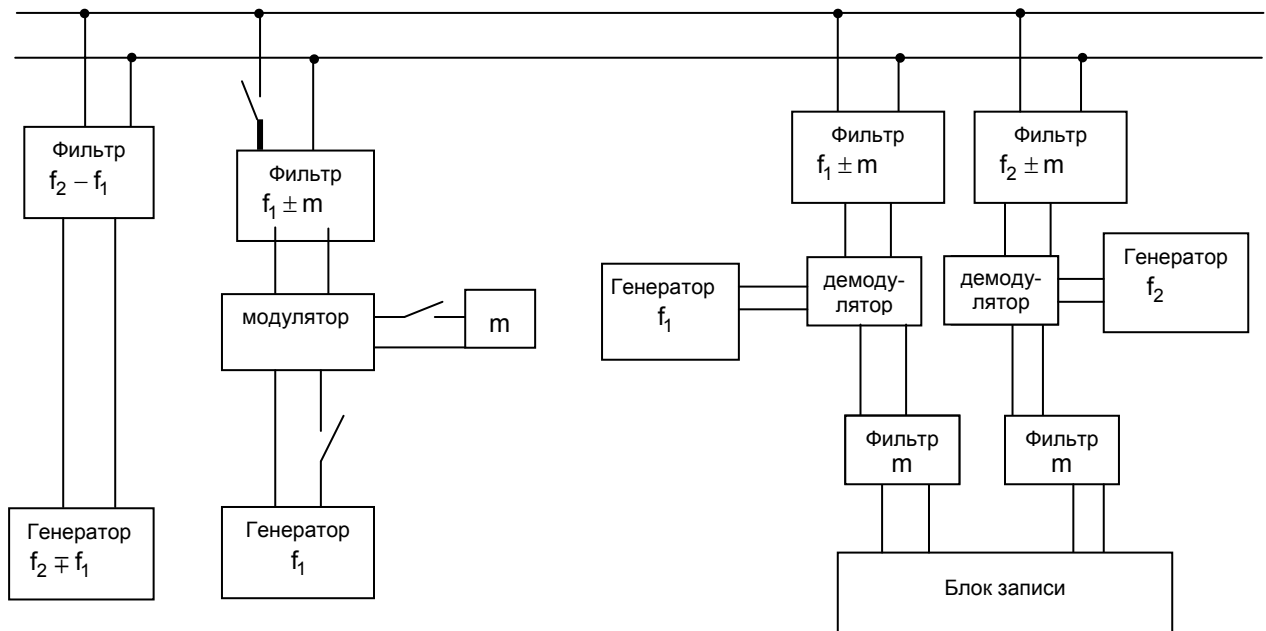


Рис. 3. Структурная схема устройства, реализующего частотно-временной метод ОМП

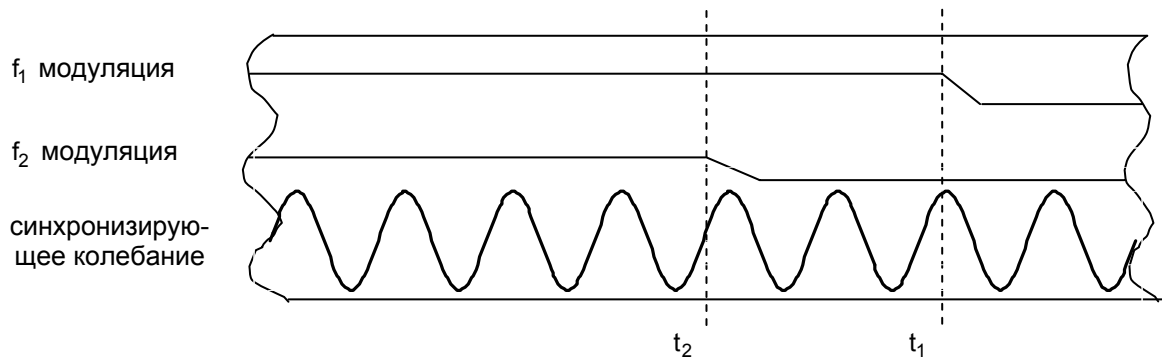


Рис. 4. Временные диаграммы частотно-временного метода

Рассмотренные частотно-временные методы можно применять также для решения других задач. Например, каналы дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий (ДФЗ) и высокочастотной (ВЧ) связи входят в технологические комплексы ЛЭП. Выход их из строя или возникновение соответствующих периодических прерываний не приводят к нарушениям передачи электрической энергии, но оказывают существенное влияние на надежность и управляемость комплексов электротехнического оборудования. Применяемые методы контроля ДФЗ и ВЧ связи направлены на диагностирование преимущественно элементов приемопередающего оборудования, но не на выявление мест повреждений ЛЭП, приводящих, например, к нарушениям каналов связи. При этом актуальной является дистанционная диагностика, имеющая целью определение расстояния до таких повреж-

дений, как набросы на ЛЭП и нарушения в целостности грозотроса, не приводящие к отключениям, нарушения в трактах ВЧ обходов каналов связи и др. Именно рассмотренные частотно-временные методы позволяют решать указанные задачи. Они могут применяться в совокупности с получением амплитудно-частотных характеристик каналов связи, формирование которых является необходимым элементом эксплуатационных работ.

Современные комплексные частотно-временные устройства с использованием цифровой обработки сигналов [8, 11, 12] могут быть реализованы согласно схеме комплексного устройства, реализующего частотно-временные методы (рис. 5). Цифровой генератор формирует сигнал с постоянным амплитудно-частотным спектром $|G(f)|$ в некоторой полосе частот Π (рис. 6).

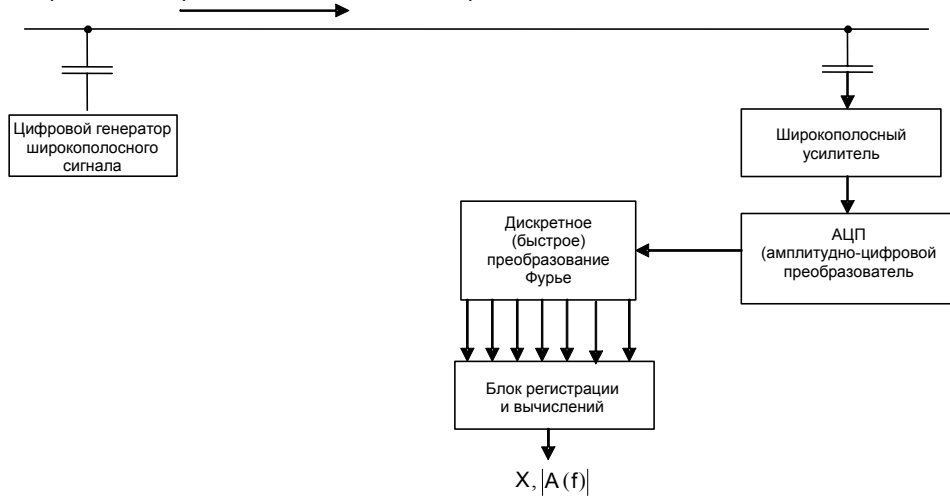


Рис. 5. Схема комплексного устройства реализующего частотно-временные методы

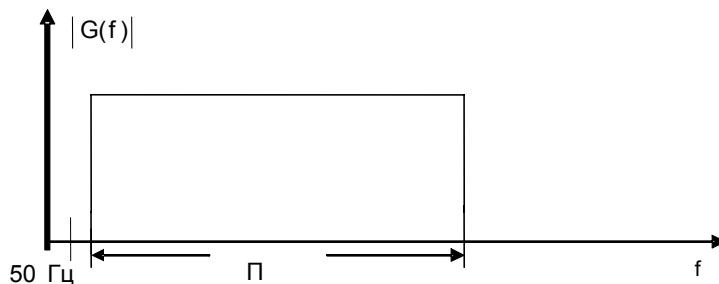


Рис. 6. Амплитудно-частотный спектр сигнала, излучаемого широкополосным генератором

Такой сигнал позволяет получать амплитудно-частотную характеристику канала $|A(f)|$ с помощью дискретного или быстрого преобразования Фурье (ДПФ, БПФ) [8].

Помимо этого производится временная регистрация сигналов различных дискретных частот блоком регистрации и вычислений. В итоге получается множество оценок расстояния до места повреждения $\{X_i\}$, которое усредняется для обеспечения результирующей точной оценки X . Процедуры усреднения могут содержать различные статистические алгоритмы теории вероятностей [9, 10] с учетом специфики распространения и затухания генерируемого сигнала на различных частотах. Заметим, что схемный вариант устройства (рис. 5) может применяться и для реализации метода с использованием комбинационных (интермодуляционных) частот.

В заключение следует заметить, что цифровые устройства формирования и обработки сигналов для диагностики ЛЭП с использованием частотно-временных методов аналогичны компонентам локационной техники [11, 12], однако отличаются значительно меньшими требованиями по быстродействию. Они достаточно эффективно реализуются на широко распространенных компонентах микропроцессорной техники и не требуют значительных аппаратных и стоимостных затрат.

Таким образом, рассмотренные частотно-временные методы ОМП на ЛЭП могут применяться как самостоятельно, так и в комплексе с другими методами в устройствах диагностики.

Мисриханов Мисрихан Шапиевич,
МЭС Центра – филиал ОАО «ФСК ЕЭС»,
генеральный директор, доктор технических наук, профессор,
телефон (495) 963-47-17,
e-mail: mmsh@mes-centra.ru

Куликов Александр Леонидович,
Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС,
директор, кандидат технических наук,
телефон (831) 257-85-50,
e-mail: info@nrmes.elektra.ru

Список литературы

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: Учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во Ир ГТУ. – 2001. Ч. 2.
3. Небера В.А., Новелла В.Н. Частотный метод определения повреждения на линиях электропередач сверхвысоких напряжений // Электрические станции. – 1995. – № 2. – С. 36–46.
4. Andrews J.F. Method and apparatus for locating transmission faults, US Pat. № 2.315.383, 30.03.1943.
5. Nyquist H. Method and apparatus for locating transmission faults, US Pat. № 2.315.450, 30.03.1943.
6. Gilbert J.J. Cable testing method by transmitting pulses of different rates of propagation, US Pat. № 2.522.362, 12.09.1950.
7. Bishop W.M. Method and means for locating nonlinearities in inaccessible cables, US Pat. № 2.570.912, 09.10.1951.
8. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
9. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Нью-Йорк, 1968: Пер. с англ. / Под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Советское радио, 1972.
10. Бартон Д. и Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. / Под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: Советское радио, 1976.
11. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория применения цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
12. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Э. Оппенгейма: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980.