

## СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ КОМАНД РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЛИНИЯМ

Асп. ЕНЬКОВ Д. А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

**Назначение и архитектура системы.** Цифровая аппаратура передачи команд по высоковольтным линиям (АПК-Ц) предназначена для передачи и приема сигнала на радиочастоте по высоковольтным линиям электропередачи (ЛЭП) и подключается к устройству присоединения без каких-либо дополнительных устройств развязки и согласования.

Аппаратура (далее – система) обеспечивает режим работы, позволяющий осуществлять прием сигналов команд релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА) от внешних источников с определенными параметрами на входы, передачу их по ЛЭП с помощью сигнала на радиочастоте, прием и вывод принятых команд РЗ и ПА с определенными параметрами на выходы.

Аппаратное обеспечение данной системы передачи является универсальным, т. е. спроектировано таким образом, что функциональность системы, алгоритм ее работы определяются полностью только используемым программным обеспечением (ПО), изменение которого может полностью изменить облик и структуру системы.

Для обеспечения гибкости конфигурирования системы, облегчения ее технического обслуживания, детализации и унификации ПО система имеет модульную структуру, в которой каждый модуль выполняет целостный неделимый этап обработки, начинающийся вводом данных с помощью стандартного интерфейса и заканчивающийся выводом данных с помощью стандартного интерфейса.

Согласно модульной организации по принципу коммуникации посредством стандартных интерфейсов аппаратура состоит из следующих модулей:

1) блока оптронов, принимающего сигналы команд РЗ и ПА от внешних источников с заданными параметрами и выводящего эти сигналы в цифровом виде на общую системную шину;

2) блока реле, принимающего сигналы команд РЗ и ПА в цифровом виде с общей системной шины и выводящего их с заданными параметрами на выходы;

3) передатчика, принимающего цифровую информацию с общей системной шины и формирующего аналоговый сигнал на радиочастоте с заданной модуляцией;

4) приемника, принимающего аналоговый сигнал с заданной модуляцией и выводящего на общую системную шину демодулированный и детектированный сигнал в цифровом виде;

5) блока управления, осуществляющего общее управление системой посредством общей системной шины, а также отвечающего за интерфейс с персональным компьютером оператора.

Кроме того, в состав аппаратуры входят следующие модули, обеспечивающие аналоговую обработку сигнала и сопряжение с линией связи (ЛЭП) и не имеющие цифровых интерфейсов:

1) усилитель мощности радиосигналов, сформированных программируемым передатчиком;

2) входное устройство, обеспечивающее подключение системы к устройству присоединения и включающее в себя также аналоговые каналные фильтры каналов приема и передачи;

3) блоки питания, обеспечивающие питание цифровых и аналоговых цепей системы различными напряжениями.

Структурная схема АПК-Ц изображена на рис. 1.

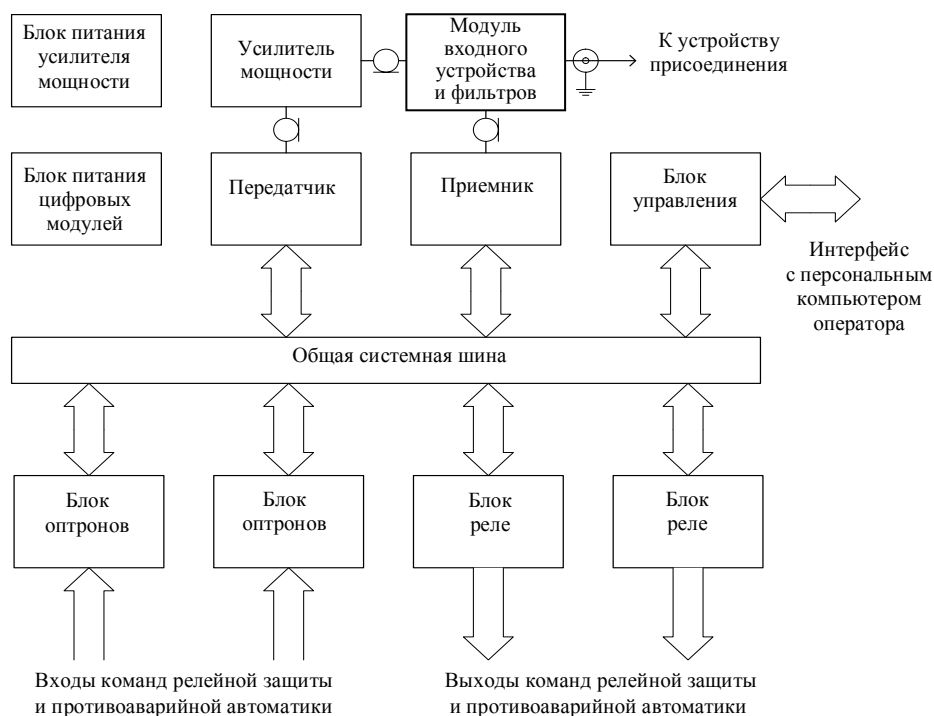


Рис. 1. Структурная схема АПК-Ц

**Передача команд РЗ и ПА** осуществляется радиосигналом с аналоговой амплитудной модуляцией. Каждой поступившей на вход системы команде РЗ и ПА ставятся в соответствие две тональные частоты из некоторого набора. Такое соответствие называется двухчастотным кодированием. Данные сигналы тональных частот модулируют несущее колебание и передаются по каналу связи в течение некоторого периода времени. Этот способ передачи (модуляции) носит название DTMF (discrete tone multiple frequency – модуляция дискретными тонами).

В системе предусмотрены возможности появления неподавленной несущей частоты для реализации дальнейших возможностей использования ее, например для контроля канала связи и иных целей, а также концентрации энергии передаваемого радиосигнала в верхней или нижней боковой полосе спектра для реализации в перспективе дуплексного режима работы системы в одном стандартном частотном канале. Ширина полосы стандартного канала в частотном диапазоне системы (24–1000 кГц) составляет 4 кГц.

Частоты тональных сигналов рассчитаны исходя из требуемого числа передаваемых команд РЗ и ПА – 32, предусмотренных техническим заданием. В конфигурацию системы для этого включены два модуля входных оптрона, содержащих по 16 входов команд (данное число определялось физическими размерами модулей и корпуса системы в целом, а также требованиями по изоляции входных высоковольтных контактов между собой). Для нахождения минимального числа тонов, необходимых для передачи 32 команд при двухтональном кодировании, необходимо решить неравенство, содержащее комбинаторную формулу

$$C_N^K = \frac{N!}{K!(N-K)!} \geq 32,$$

где  $K = 2$  – число тонов кода команды;  $N$  – общее число тональных частот. После несложных преобразований получается  $N \geq 9$ .

Кроме того, при разработке концепции построения системы было заложено наличие еще одного тонального сигнала, располагающегося на краю (краях) полосы канала и служащего для обозначения режима работы системы – передачи команд РЗ и ПА или передачи данных. Данный тональный сигнал получил название «пилот-сигнал».

Распределение тональных частот по спектру видеосигнала показано на рис. 2.

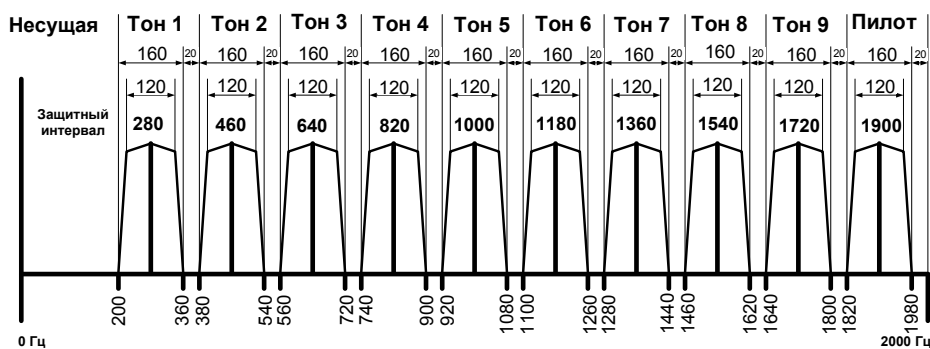


Рис. 2. Распределение тональных частот по спектру видеосигнала

**Преимущества передачи тональными частотами.** Передача команд РЗ и ПА является самой важной для рассматриваемой системы функцией, к которой предъявляются высокие требования по двум параметрам – надежности и времени передачи. Надежность передачи характеризуется вероятностью:

- ложной тревоги;

- пропуска команды;
- неправильного приема.

Возникновение любых (обоснованных или безосновательных) внештатных (аварийных) ситуаций в сетях энергообеспечения может дорого обойтись и поставщикам электроэнергии, однако по сложившейся традиции первый из параметров надежности является приоритетным.

Под временем передачи команды понимается промежуток времени между фиксацией поступившей команды РЗ и ПА на входе системы и фиксацией переданной по каналу связи команды на выходе. В мировой практике действующие и вновь разрабатываемые системы имеют время передачи не более 25 мс.

Как сказано выше, команды РЗ и ПА передаются системой по каналу связи (ЛЭП) радиосигналом с аналоговой амплитудной модуляцией тональными частотами в отличие от данных, которые передаются радиосигналом с цифровой модуляцией 8PSK. При выборе способа надежной передачи команд РЗ и ПА учитывались следующие соображения:

- способ кодирования и передачи команд РЗ и ПА тональными частотами известен давно, широко распространен и зарекомендовал себя на практике;
- сигналы с цифровой модуляцией и символьной передачей по каналу связи требуют символьной и кадровой синхронизации, которая очень подвержена воздействию импульсных помех, представляющих наибольшую угрозу надежности передачи по ЛЭП;
- меры повышения надежности передачи цифрового сигнала (снижение символьной скорости, ужесточение требований к цифровым фильтрам, увеличение избыточности кодирования и проч.) обуславливают увеличение времени прохождения команды РЗ и ПА по радиотракту, что не позволяет соответствовать накладываемому ограничению в 25 мс при отведенной полосе одного канала;
- отношение сигнал/шум (ОСШ) при передаче команд РЗ и ПА тональными частотами значительно больше, чем при передаче сигнала с цифровой модуляцией, что увеличивает надежность передачи.

Последний пункт требует отдельного пояснения. ОСШ является важным параметром системы передачи информации, поскольку он определяет качество ее работы. При аттестации систем по ОСШ шум измеряется в полной полосе канала связи (4 кГц). Аналоговый радиосигнал при передаче команды РЗ и ПА представляет собой амплитудную модуляцию с двумя тонами с одной боковой полосой и подавленной несущей. Таким образом, мощность на приемной стороне сосредоточена в узкой полосе двух фильтров тональных частот против 4 кГц полной полосы канала при передаче сигнала с любым другим видом модуляции. Следовательно, шум, попадающий в полосу тех же фильтров тональных частот, становится пропорционально меньше, что приводит к росту ОСШ (рис. 3).

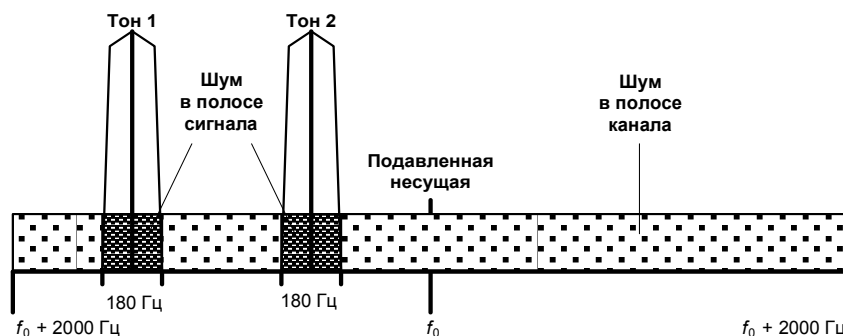


Рис. 3. Снижение шума при передаче команд тональными частотами

Выигрыш в ОСШ равен отношению полной полосы канала к сумме двух узких полос фильтров тональных частот и составляет порядка 10 дБ. На практике это означает, что если ОСШ в полосе канала равно нулю, на выходе узкополосных фильтров тональных частот оно будет составлять как раз эти 10 дБ. Таким образом, можно утверждать, что системы с DTMF-модуляцией способны функционировать даже под уровнем шумов.

Такой характерной особенностью обладают только широкополосные сигналы с цифровой модуляцией. Однако их практическая реализация в каналах связи по ЛЭП невозможна по одной из двух взаимоисключающих причин:

- при реализации широкополосного сигнала в заданном частотном канале 4 кГц действительная скорость передачи информации будет слишком низка, чтобы обеспечить одновременно заданные время передачи команды РЗ и ПА и надежность;
- для реализации широкополосного сигнала с заданными временем передачи команды РЗ и ПА и надежностью потребуется использовать сразу несколько стандартных частотных каналов, в связи с чем альтернатива аналоговой передаче команд РЗ и ПА тональными частотами отсутствует.

**Алгоритм надежного приема команд.** Прием сигналов команд РЗ и ПА ведется с помощью полосовых фильтров тональных частот. При расчете фильтров учтены следующие противоречивые требования:

- обеспечение наибольшей возможной избирательности – для исключения влияния шумов и побочных каналов приема;
- обеспечение наименьшего времени отклика – для выполнения требований по времени передачи команды РЗ и ПА;
- синхронность работы всех тональных фильтров – для одновременного накопления сигнала и фиксации принятых тональных частот;
- максимальная идентичность параметров – для получения одинаковых откликов на весь набор тональных частот с целью более надежного их распознавания.

Обеспечение большей избирательности противоречит обеспечению наименьшего времени отклика, поскольку для первого необходимо повышение порядка фильтра, для второго – понижение.

Обеспечение идентичности параметров всех тональных фильтров, на первый взгляд, не входит в противоречие с синхронностью работы, поскольку для синхронной работы необходим одинаковый порядок. Однако при одинаковом порядке на практике не удалось получить одинаковые параметры подавления в полосе задержания для фильтров разных тонов, поэтому данные требования сформулированы отдельно.

Для определения частоты дискретизации  $F_s$  на входе фильтров тональных частот должна быть известна частота дискретизации АЦП. Подбор  $F_s$  осуществлялся варьированием коэффициента децимации в цифровом приемном тракте и составил 9600 Гц. Фильтры рассчитаны с помощью программы математических расчетов и моделирования MathLab как полосовые эллиптические БИХ-фильтры минимального порядка с подавлением в полосе задержания 45–50 дБ и неравномерностью в полосе пропускания 3 дБ. Границы полос пропускания и задержания соответствуют рис. 2.

Кроме набора приемников тональных частот, сигнал на выходе которых пропорционален амплитуде поступившей на входы смеси тональных частот с помехами и шумами канала связи, важную роль в обеспечении безопасного и надежного приема команд РЗ и ПА играет алгоритм их декодирования.

При разработке алгоритма приема и декодирования учитывались следующие соображения:

- в отсутствие команд РЗ и ПА по каналу связи передается пилот-тон (его наличие является критерием отсутствия команды);
- при передаче команды РЗ и ПА пилот-тон не передается (его отсутствие является критерием наличия команды, либо неисправности канала связи);
- на входе комплекта приемников тональных частот сигнал проходит через схему быстродействующей автоматической регулировки усиления (БАРУ), которая приводит его уровень к практически постоянной величине (отклики на выходах приемников тональных частот также постоянны);
- при передаче команды возможно присутствие в канале связи только двух тонов (большее или меньшее зафиксированное их количество свидетельствует о помехе);
- команда РЗ и ПА присутствует в канале связи в течение некоторого промежутка времени (слежение за длительным присутствием команды на выходе приемника позволяет отличить ее от импульсной помехи и увеличивает надежность приема).

Поскольку входной уровень сигнала приводится схемой БАРУ к более-менее постоянной величине, на выходах приемников тональных частот сигналы также будут постоянными, поэтому целесообразно установить два порога принятия решения о наличии тона – верхний и нижний. Если сигнал на выходе превышает верхний порог, либо не дотягивает до нижнего, значит, возможно, это помеха, и ее следует игнорировать во избежание ложного обнаружения команды.

Кроме того, импульсные помехи, являющиеся наиболее опасными в рассматриваемом канале связи – ЛЭП, имеют очень широкий спектр, поэтому длительное присутствие помехи на выходах двух, и только двух приемников тональных частот – маловероятное событие, способствующее увеличению безопасности приема.

Процесс приема и фиксации тона наглядно иллюстрирует рис. 4.

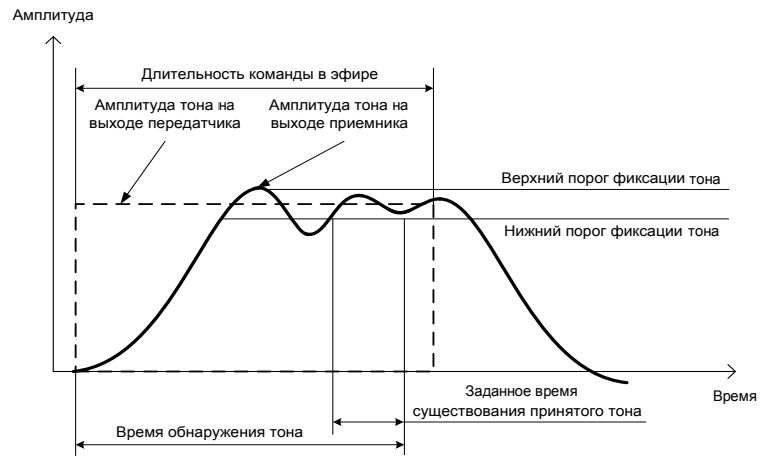


Рис. 4. Сигнал на выходе приемника тональной частоты

Руководствуясь изложенными принципами, можно представить алгоритм надежного декодирования принятых команд блок-схемой, представленной на рис. 5.

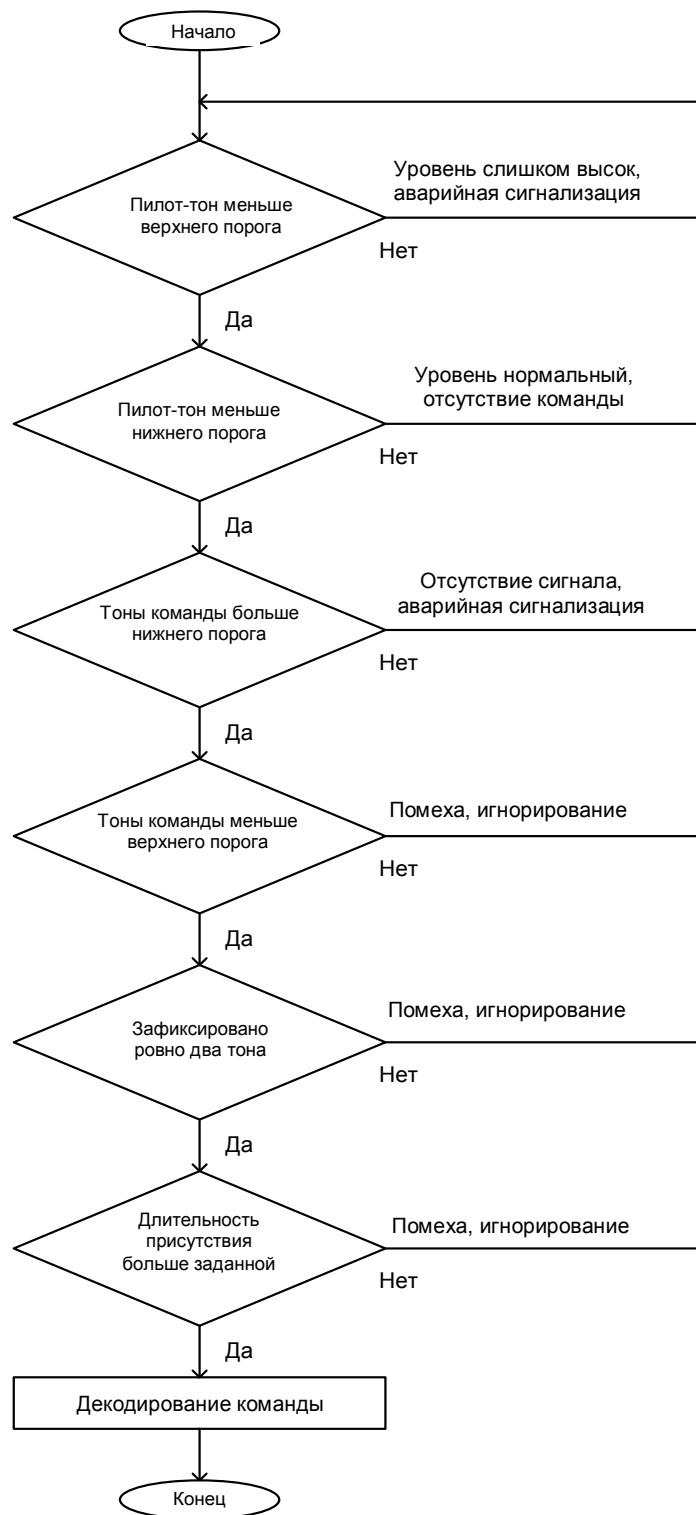


Рис. 5. Алгоритм надежного декодирования тональных частот  
**ВЫВОД**

Цифровая система передачи команд РЗ и ПА по высоковольтным линиям, организованная по изложенным выше принципам, находится на стадии