

Микросхемы узкополосных приёмопередатчиков PLC для промышленного и бытового применения

Юрий Троицкий, Александр Нестеров,
Александр Ширяев (г. Смоленск)

При грамотном выборе элементной базы современные аппаратные средства позволяют оперативно строить эффективные информационные и управляющие сети на базе PLC. В статье выполнен обзор существующих ИС узкополосных приёмопередатчиков, отличающихся используемым способом модуляции сигналов. Авторы надеются, что это облегчит выбор элементной базы для решения конкретной технической задачи.

Разветвлённая энергетическая сеть давно привлекала внимание специалистов в области телеметрии и телеуправления в качестве потенциальной среды для реализации каналов связи. Достижения современной электроники значительно расширили информационные возможности PLC (Power Line Communication, связь по сетевому проводу). Появление новых микросхем, поддерживающих стандарт HomePlug AV, позволило увеличить скорость передачи информации по сетям PLC до 200...300 Мбит/с, что обеспечивает передачу по силовым линиям телевизионных сигналов высокой чёткости (HDTV), звуковой информации VoIP и широкополосный интернет-доступ.

Однако высокие частоты, необходимые для высокоскоростных приложений, сильно затухают в линии, что делает возможным передачу сигнала с удовлетворительным качеством без ретрансляторов только на расстояние до нескольких сотен метров. Поэтому в системах управления находят широкое применение узкополосные NB (Narrow Band) системы, работающие в килогерцовом диапазоне. К узкополосным низкоскоростным распределённым системам управления и учёта относятся АСУ ТП в цехах и на производственных территориях, системы жизнеобеспечения зданий (лифты, кондиционеры, вентиляция), складские системы, средства учёта энерго-

потребления, системы охранной и пожарной сигнализации в дачных поселках, гаражных кооперативах и т.д.

Другой класс приложений составляют средства домашней автоматики, позволяющие комплексно управлять бытовыми приборами, вплоть до автоматического согласованного включения кофеварок и тостеров, а также вывода на телеэкран изображения с входной видеокамеры. Сюда же можно отнести локальные сети для домашних и малых офисов, развёрнутые в пределах небольшого здания или отдельной квартиры.

Надёжность передачи на физическом уровне определяется свойствами среды передачи, способами кодирования и декодирования информации. Электрические силовые цепи, не предназначенные специально для создания информационных сетей, обладают целым рядом недостатков. К ним следует отнести нестабильность импеданса канала, зависящего от характера включаемой и выключаемой нагрузки, высокий уровень помех и большое затухание сигнала.

Статистические исследования многих авторов показали, что импеданс большинства NB-сетей лежит в диапазоне 5...150 Ом [1]. В последнее время, прежде всего на транспорте, для создания информационной сети всё чаще используют силовые цепи постоянного тока, которые имеют импеданс до нескольких Ом, преимуще-

ственно ёмкостного характера. Естественно, что для согласования нагрузочных характеристик выходных каскадов PLC-передатчиков следует учитывать особенности силовых цепей. Снижение влияния помех, присутствующих в линии, на физическом уровне достигается эффективным использованием на приёмном конце узкополосных аналоговых и цифровых фильтров.

Повышение надёжности передачи на физическом уровне во многом обусловлено выбором способа модуляции и частотного диапазона, а также использованием методов цифровой обработки сигналов и адаптивного управления. По способу модуляции различают две группы приёмопередатчиков: одночастотные приёмопередатчики (SFPLC) и приёмопередатчики с широким диапазоном частот модуляции (SS, Spread Spectrum).

В приёмопередатчиках SFPLC используется одна несущая частота, которая подвергается амплитудной (ASK), частотной (FSK) или фазовой (PSK) модуляции. Рассмотрим основные принципы реализации указанных методов в некоторых типах выпускаемых интегральных приёмопередатчиков.

ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКИ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

При амплитудной модуляции логической единице соответствует наличие сигнала несущей, логическому нулю – его отсутствие.

Приёмопередатчик TDA5051AT

Характерным представителем ИС приёмопередатчиков, поддерживающих этот тип модуляции, является микросхема TDA5051AT фирмы NXP Semiconductors (Philips) [2]. Логической единице соответствует

высокоимпеданное состояние выхода передатчика TX_{OUT} (см. рис. 1), лог. 0 передаётся пакетом импульсов несущей частоты. Частота несущей лежит в пределах 95...148 кГц. Микросхема позволяет передавать данные со скоростью от 600 до 1200 бод.

Схема включения ИС требует минимального количества дополнительных компонентов. Встроенный выходной усилитель обеспечивает работу на нагрузку с импедансом до 1 Ом (типичная – 30 Ом) (см. рис. 2). ИС применяется в недорогих и низкоскоростных приложениях. Простота модуляции позволяет реализовать ASK-приёмопередатчик на базе простых универсальных микроконтроллеров.

ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКИ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Частотная (FSK) модуляция используется в ИС приёмопередатчиков KP1446ХК1 производства ОАО «Ангстрем» и ST7538/ ST7540 фирмы STMicroelectronics [3]. Модуляция выходного сигнала в этих схемах заключается в том, что лог. 0 соответствует частота ($f_0 - \Delta f$), а лог. 1 – ($f_0 + \Delta f$), где f_0 – центральная частота несущей.

Приёмопередатчик KP1446ХК1

Центральная частота f_0 может задаваться программно равной 66,66, 100 или 133,33 кГц; девиация частоты Δf составляет примерно $\pm 4,6$ кГц. Скорость передачи может принимать одно из четырёх возможных значений – 124, 248, 496, 992 бит/с – и задаётся во время программирования приёмопередатчика.

Для исправления одиночных и обнаружения двойных ошибок, которые могут возникать при передаче из-за помех в сети, используется помехозащищённое кодирование. Чувствительность приёмника достаточна для передачи с фазы на фазу. Мощность выходного каскада микросхемы не превышает десятка милливатт, что требует обязательного применения внешнего усилителя мощности. Необходимо также устанавливать внешний узкополосный фильтр на входе приёмника для снижения влияния помех. По соотношению качество/цена эта микросхема – безусловный лидер на российском рынке. Основным недостатком ИС – низкая реальная скорость передачи информации.

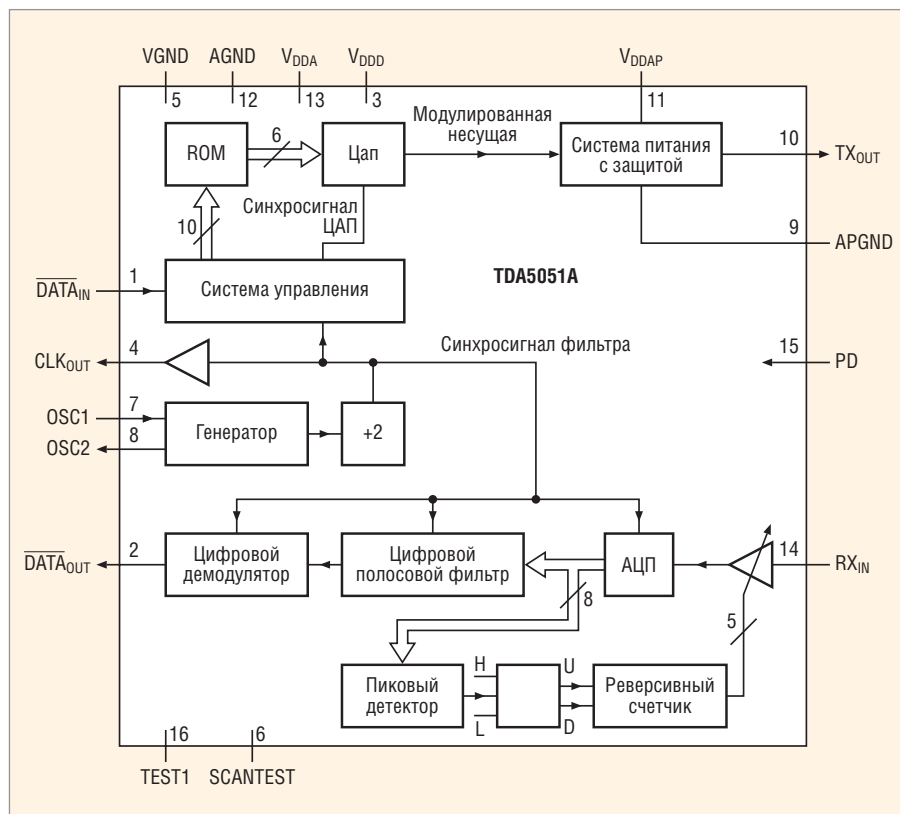


Рис. 1. Структурная схема TDA5051AT

Приёмопередатчик ST7538/ST7540

Для микросхем ST7538/ST7540 [4] частота f_0 программируется семью значениями в диапазоне 60...132,5 кГц. Кроме того, программируются четыре значения скорости передачи (Baud rates), девиация частоты Δf и коэффициент девиации $K_D = \Delta f/\text{Baud rates}$ (см. таблицу). Таким образом, значение Δf будет равно значению Baud rates при $K_D = 1$ и 0,5 Baud rates – при $K_D = 0,5$. Лог. 1 (метка) и лог. 0 (пауза) определяются как $f(0) = f_0 + \Delta f/2$, $f(1) = f_0 - \Delta f/2$.

Приёмопередатчик (см. рис. 3) не имеет встроенного буфера для формирования и хранения пакета передаваемых или принимаемых данных. Очередной бит данных поступает от хост-контроллера по входу TxD через последовательный интерфейс на вход FSK-модулятора, который синтезирует частоты $f(0)$ или $f(1)$, стабилизированные кварцевым резонатором 16 МГц, при помощи технологии прямого цифрового синтеза. С помощью цифрового Tx-фильтра выделяется первая гармоника сигнала и усиливается усилителем с переменным коэффициентом усиления (ALC) от 0 до 30 дБ с шагом 1 дБ.

Коэффициент усиления ALC определяется информацией об уровне

сигнала, полученной при помощи двух цепей обратной связи. Одна цепь стабилизирует амплитуду выходного сигнала путём сравнения напряжения, снимаемого с резистивного делителя, подключаемого к выходу АТ0, и внутреннего опорного напряжения. В зависимости от результатов сравнения происходит увеличение или уменьшение коэффициента усиления. Максимальный уровень выходного напряжения устанавливается подбором резисторов делителя в цепи обратной связи.

Обратная связь по току ограничивает максимальный выходной ток

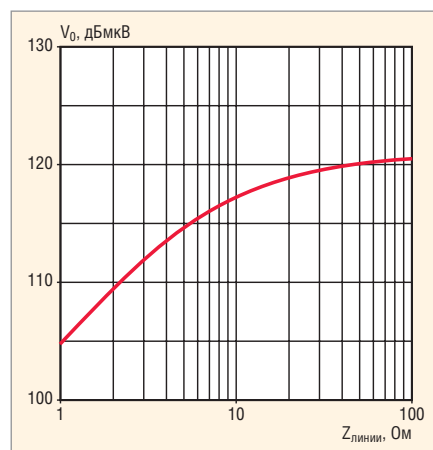


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения передатчика микросхемы TDA5051AT от импеданса нагрузки

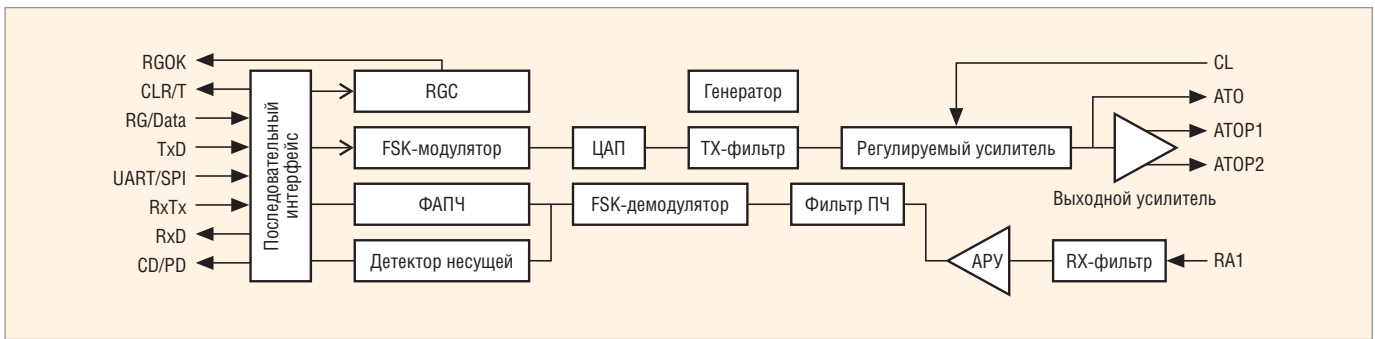


Рис. 3. Упрощённая структурная схема приёмопередатчика ST7538/ST7540

каскада усилителя. Ток ограничения устанавливается номиналом резистора, подключённого между выводами CL и Avss (вход напряжения аналогового питания).

Выходной усилитель (PLI) представляет собой сдвоенный усилитель класса АВ с двумя выходами (АТОР1 и АТОР2), работающими в противофазе. Возможны два варианта включения навесных каскадов:

- использование только выхода АТОР1;
- мостовое соединение.

Мостовое соединение обеспечивает дифференциальный выход с двойной амплитудой по сравнению с вариантом включения одиночного каскада. Системе выходных каскадов необходимо хорошо сглаженное напряжение питания PAV_{cc}, чтобы она не входила в нелинейный режим работы. Для удобства отслеживания работы выходных каскадов предназначен вывод АТО. На этот вывод присоединён выход усилителя АLC, который, однако, не предназначен для работы на низкоомную нагрузку.

Приём информации от линии связи происходит, если хост-контроллер устанавливает на входах приёмопередатчика логические уровни RxTx = 1, REG_DATA = 0. Входной сигнал считывается с вывода RAI относительно вывода земли сигнала SGND. Полученный сигнал «предварительно» фильтруется полосовым фильтром (Rx filter). Данный первичный фильтр можно включать и отключать установ-

кой соответствующего бита в управляющем регистре. Сигнал проходит через блок усиления с АРУ (AGC) и поступает на полосовой фильтр с узкой полосой пропускания (14 кГц) и центральной частотой, соответствующей выбранной несущей частоте передачи. Далее принятый сигнал накладывается на сигнал с частотой, устанавливаемой битами 0 – 2 управляющего регистра, фильтруется дополнительным фильтром и отправляется в FSK-демодулятор. На выходе FSK-демодулятора установлен цифровой фильтр нижних частот. После прохождения цифрового фильтра сигнал поступает на вывод RxD. В отсутствие входного сигнала вывод RxD находится в состоянии лог. 0 или лог. 1, в зависимости от выбранного интерфейса обмена с хост-контроллером.

Микросхема ST7538Q/ST7540Q содержит встроенную систему синхронизации, обеспечивающую режим синхронного обмена с хост-контроллером (вывод CLR/T). Наличие информации на входе приёмника определяется детектором несущей CD (Carrier Detection) по наличию на входе RAI сигнала, близкого по своему гармоническому составу к запрограммированной несущей частоте. Вывод CD_PD устанавливается в низкий логический уровень, если на входе RAI обнаруживается несущая частота; в её отсутствие вывод находится в состоянии высокого логического уровня.

При использовании расширенного регистра управления имеется воз-

можность установить заголовок передачи кадра. Данный заголовок будет добавляться при передаче к информационным кадрам, передаваемым в сеть. Если установить соответствующий бит управляющего регистра, вывод CD/PD будет устанавливаться в низкий логический уровень только после обнаружения в принимаемом сигнале такого же заголовка. Сигнал CD/PD может быть использован хост-контроллером для вызова обработчика прерывания.

Микросхема имеет встроенный усилитель мощности передатчика с выходным током до 300 мА. Важным условием является контроль температуры кристалла, для чего в микросхему введен блок Thermal sensor, измеряющий температуру элементов выходного каскада, который производит его автоматическое отключение при достижении температуры 170°C ± 10%. Кроме того, блок Timer реализует функцию защиты от слишком длительной передачи. Если защита включена, то спустя 1...3 с после начала передачи микросхема принудительно переводится в режим приёма. В этом случае вывод TOUT устанавливается в лог. 1 и сохраняется минимум 125 мс. Сбросить блокировку передачи можно переводом вывода RxTx в высокий уровень, т.е. переходом в режим приёма данных. Если этого не сделать, блокировка передачи сохранится даже по истечении 125 мс. Поэтому, чтобы продолжить передачу, необходимо кратковременно перевести ST7538Q в режим приёма. Включение и выключение блокировки, а также настройка времени блокировки осуществляется установкой соответствующих битов в управляющем регистре.

ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКИ С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Фазовая модуляция реализована в PLC-модеме C2000 фирмы Texas Instru-

Возможные значения скорости передачи, девиации частоты и коэффициенты девиации для микросхем ST7538/ST7540

Скорость передачи бит/с	Δf	Коэффициент девиации, K_f
600	600	1
1200	600/1200	0,5/1
2400	12000/2400	0,5/1
4800	2400/4800	0,5/1

ment [5]. Частота несущей $f_0 = 131,579$ кГц, скорость передачи 5,482 Кбит/с, эффективная скорость передачи 3,748 Кбит/с. Модулятор построен на базе цифрового сигнального процессора (DSP) TMS320 с внешними узкополосным фильтром и усилителем передатчика (TLPFA), узкополосным фильтром приёмника (RPLF), разделительными конденсаторами и трансформатором (см. рис. 4).

Рассмотрим принцип двукратной фазовой манипуляции (BPSK), используемой в рассматриваемом модеме. Сложение на сумматоре SM двух ШИМ-сигналов PWM1 и PWM2, снимаемых с выходов Out1 и Out2 цифрового сигнального процессора, обеспечивает формирование трёхуровневого сигнала PWM1 – PWM2 (см. рис. 5), следующего с периодом T , равным 24 тактам несущей частоты CLK (131,5 кГц). Таким образом, передача осуществляется со скоростью 5,5 Кбит/с. Фаза каждого бита может быть установлена 0° (см. рис. 5а) или 180° (см. рис. 5б). Длительность импульсов разностного сигнала равна $t_{\text{н}} = 1/3T$ ($t_{\text{н}} = 8\text{CLK}$). Такое соотношение между $t_{\text{н}}$ и T обеспечивает мини-

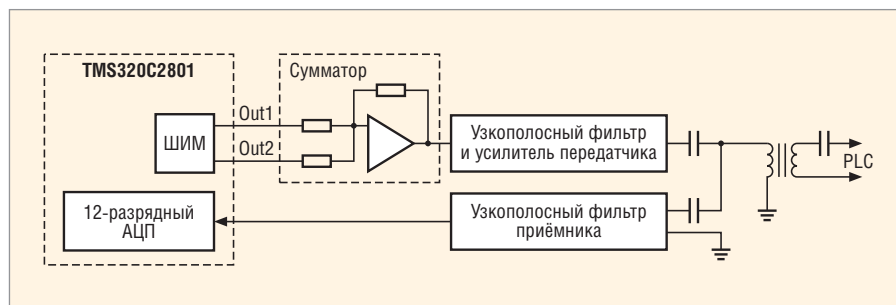


Рис. 4. Структурная схема приёмопередатчика PLC модема C2000 фирмы Texas Instruments

мальную величину суммарного значения коэффициента нелинейных искажений (ТНД) после выделения узкополосным фильтром (TLPFA) первой гармоники. Синусоидальный сигнал первой гармоники выделяется узкополосным фильтром передатчика TLPFA и через разделительные конденсаторы и трансформатор передается в силовую линию PLC.

На приёмной стороне полученный сигнал проходит через активный узкополосный фильтр приёмника RPLF и через дискретные интервалы времени, равные $1/25T$, поступает на вход АЦП цифрового сигнального процессора. Выборка пришедшего сигнала с частотой дискретизации

$f_s = 25/24\text{CLK} = 137$ кГц позволяет выделить частоту несущей $f_0 = 131,5$ кГц и частоту передачи байта $f_N = 5,5$ кГц. Оцифрованные данные содержат произведение сигналов двух частот f_0 и f_s . Как известно, произведение двух синусоидальных сигналов содержит составляющие суммы $(f_0 + f_s = 2f_0 + f_N)$ и разности двух частот $(f_s - f_0 = f_N)$.

Полученная цифровая выборка содержит описание принятого бита сигнала (синусоида с частотой 5,5 кГц) и шум коммуникационного канала. Частично шум канала был удалён с помощью активного аналогового узкополосного фильтра второго порядка. Дополнительная фильтрация осуществляется цифровым (FIR) филь-

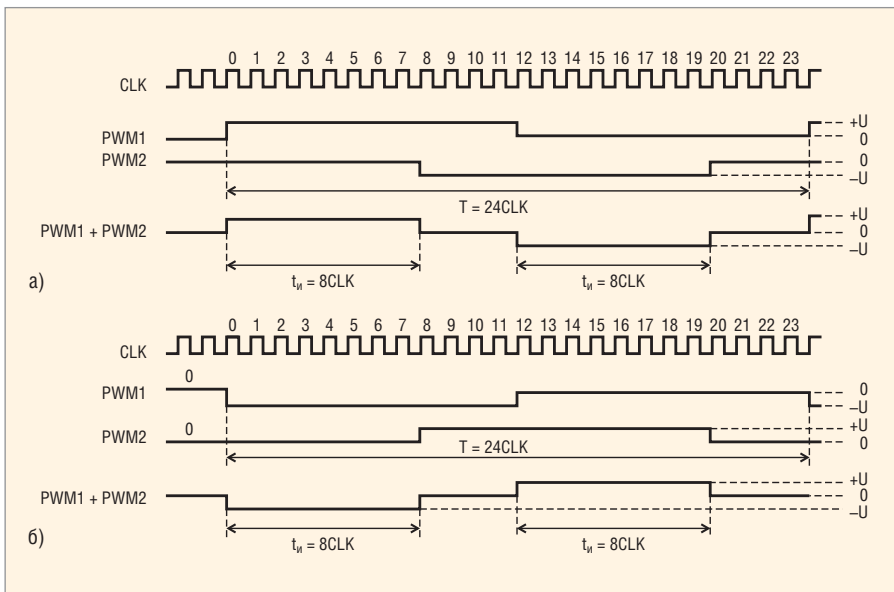


Рис. 5. Формирование трёхуровневого сигнала с фазой (а) 0° и с (б) 180°

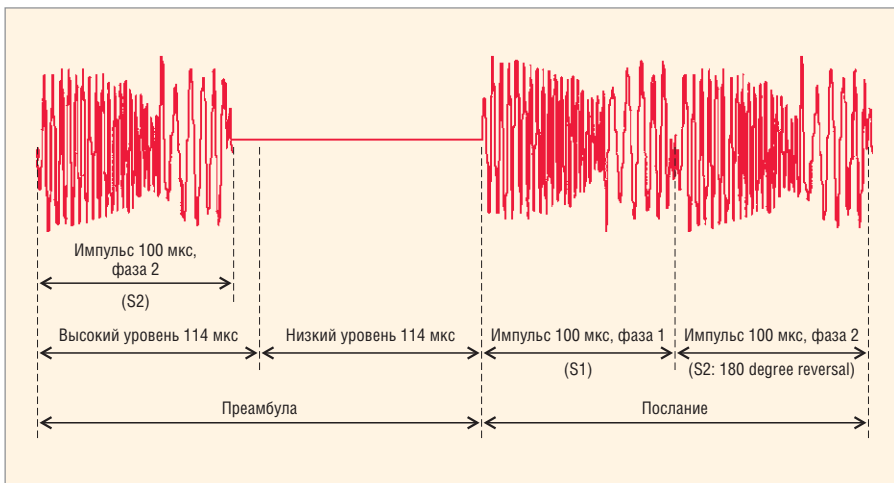


Рис. 6. Формирование лог. 0 и лог. 1 при SSC-модуляции

ром. Затем детектируется фаза сигнала и, соответственно, определяется значение принятого бита.

В данной системе используется асинхронный способ передачи, поскольку тактовые сигналы синхронизации формируются на приёмной и передающей стороне своими тактовыми генераторами, частоты которых не могут быть абсолютно одинаковыми. Поэтому используется техника дифференциального фазового детектирования. На выходе коррелирующего фильтра DPS выделяется разность фаз предыдущего и вновь принятого бита. Если их фазы совпадают, то и значение принятого бита не меняется; если фазы не совпадают, значение вновь принятого бита инвертируется относительно предыдущего. Приём начинается с распознавания битов синхронизации (bit sync), представляющих собой последовательность 24 чередующихся единиц и

нулей (10101010101010101010). Данные, как правило, передаются в 11-битном формате, включающем, помимо байта данных, два чередующихся стартовых бита (suffix '0 1') и бит контроля чётности.

ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКИ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТ МОДУЛЯЦИИ (SS)

Сущность SS-модуляции (Spread Spectrum) заключается в использовании спектра частот с полосой, превышающей минимально необходимое значение, требуемое для передачи информации, т.е. информационный сигнал с полосой частот B в течение времени T_S преобразуется в псевдослучайный сигнал со спектром W ($W \gg B$). Отношение $GM = W/B = W T_S$ называют коэффициентом расширения полосы пропускания (spreading gain). Значение G в разных устрой-

ствах может лежать в пределах от 4 до 256. При использовании SS-модуляции мощность сигнала распределяется в широкой полосе частот, и сигнал становится незаметным на фоне помех, что повышает защиту информации от несанкционированного доступа при передаче по линии связи. Помимо защиты информации, SS-модуляция обеспечивает более высокий уровень помехозащищённости. На принимающей стороне полезная информация выделяется из шумоподобного сигнала с использованием уникальной – для данного сигнала – псевдослучайной кодовой последовательности.

Приёмопередатчик с SSC-модуляцией

Примером приёмопередатчика, использующего SS-модуляцию (или SSC-модуляцию), служит микросхема типа SSC P485 PL [6], обеспечивающая передачу со скоростью 9600 бит/с. Физический уровень протокола связи CEBus основан на технологии расширения спектра, запатентованной фирмой Intellon Corp. of Ocala (США). В отличие от традиционной широкополосной техники (скачки частоты или прямое последовательное расширение), в предложенном методе закон изменения частоты несущей задаётся 360 квантованными значениями, которые выбираются так, чтобы максимизировать энергию внутри полосы, сохраняя объём внеполосных гармоник на минимальном уровне. При передаче каждого бита частота несущей в течение 100 мкс изменяется сначала от 200 до 400 кГц, а затем от 100 до 200 кГц.

Формирование служебных и информационных бит происходит по-разному. Каждый пакет данных начинается с преамбулы, которая формируется с использованием амплитудной (ASK) модуляции. При ASK-модуляции используются понятия SUPERIOR (высокого) и INFERIOR (низкого) уровней. Уровень SUPERIOR характеризуется присутствием несущей частоты, а INFERIOR – её отсутствием (см. рис. 6). Данные передаются с использованием более помехозащищённой фазовой модуляции (PRK), при которой используется два состояния SUPERIOR: SUPERIOR1 и SUPERIOR2, которые отличаются друг от друга поворотом фазы несущей на 180° (см. рис. 7).

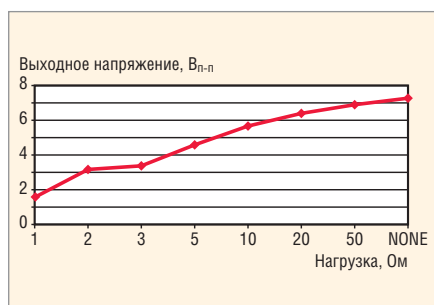


Рис. 7. Нагрузочная характеристика усилителя SSC P111

Выход передатчика ТО допускает ток нагрузки не более 6 мА, поэтому не может быть подключен непосредственно к линии связи. В комплекте с микросхемой приёмопередатчика используется усилитель SSC P111 [6] с нагрузочной характеристикой, показанной на рисунке 7.

ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОДОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (DCSK)

Приёмопередатчик IT5000 разработан израильской фирмой Itran Communications (<http://www.itran-comm.com>) по запатентованной тех-

нологии дифференциальной кодовой модуляции (DCSK). Данный тип модуляции, по мнению фирмы, обеспечивает эффективное подавление всех видов помех, присутствующих в силовой сети. Кроме того, для повышения надёжности передачи используется помехозащищённое кодирование. Чувствительность приёмника составляет 1 мВ. Микросхема IT5000 обеспечивает скорость передачи 10...50 Кбит/с при частоте несущей 100...400 кГц и 2...10 Кбит/с при частоте 20...80 кГц.

Если учесть низкую стоимость микросхемы (около 6 долл. США), то её преимущества перед всеми рассмотренными ИС становятся очевидными. Однако фирма Itran очень неохотно идёт на контакты, и получить более подробную информацию авторам пока не удалось. На российском рынке в настоящее время присутствуют отладочные модули KIT5000UZ стоимостью около 150 евро.

Следует отметить, что в последние годы не зарегистрировано появление новых типов узкополосных приёмопередатчиков, что можно рассматри-

вать как определённый застой в этом секторе сетевых устройств. Вместе с тем, строительный бум, сопровождающийся информационным бумом в бытовой сфере, должен вновь привлечь внимание к использованию сетей PLC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hrasnica H., Haidine A., and Lebnert R. Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, 2004.
2. TDA5051A Home automation modem. www.semiconductors.philips.com.
3. KP 1446 XK1. Приёмопередатчик по сети переменного тока 110–380 В. ОАО Ангстрем, www.angstrem.ru.
4. FSK power line transceiver ST7538. STMicroelectronics, www.st.com.
5. TMS320C2000™ Digital Signal Controller Power Line Communication User's Guide. SPRU714, August 2005.
6. Technical Data Sheet SSC P485 PL Transceiver IC. <http://www.intellon.com>.
7. Technical Data Sheet SSC P111 PL Media Interface IC. <http://www.intellon.com>.
8. Подгурский Ю., Заборовский В. Технологии и компоненты передачи данных по линиям электропитания. Сети, ЦНИИ РТК. 1999. № 10.