

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ВИТОЙ ПАРЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ RS-485 И PROFIBUS



[П.В. ГАЛКИН](#), [В.В. ГАВРИЛЕНКО](#), [А.И. МОНЬКО](#)

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Abstract – In the article analysis of data transmission in industrial networks, RS-485 and ProfiBus (ProfiBus-DP and ProfiBus-FMS) has been conducted. The tasks of determining the reliability of data delivery at the different speeds and determining the maximum distance transmission over twisted pair have been set. These problems have been resolved with the use of equivalent circuits and conducting real experiments. Data transfer via RS-485 and transfer data via Profibus were considered. Algorithm and program of study data transfer for industrial networks based on twisted pair have been proposed. The scheme for the study on the basis of single Board computers, the BeagleBone Black has been proposed. For the implementation of the RE / DE signal drivers Linux Debian for a modified version of OMAP driver to connect half duplex RS-485 transceiver was used. During the experiments, work rates for transmission of the equivalent twisted pair cable and a real cable have been set. To determine the reliability of data delivery at different rates, the rates corresponding to the operation modes of the ADM2485 have been applied. We used the Python programming language to implement test data transmission on RS-485 network and ProfiBus. For the first time practical research of data transmission in industrial networks, RS-485 and ProfiBus using the single-Board computer BeagleBone Black has been conducted. The maximum data transmission rate for actual cable and its equivalent have been defined. The algorithms and program of studying data transfer for industrial networks based on twisted-pair can be applied to cables of any length.

Анотація – У роботі проведено аналіз передачі даних у промислових мережах RS-485 і ProfiBus (ProfiBus-DP і ProfiBus-FMS). Вирішувалися завдання визначення надійності доставки даних на різних швидкостях передачі і визначення максимальної дистанції передачі по кабелю типу "скручена пара". В роботі запропонований алгоритм і програма дослідження передачі даних для промислових мереж на базі кабелю типу "скручена пара". Запропоновано схему дослідження на базі одноплатних комп'ютерів BeagleBone Black. В ході експериментів було встановлено робочі швидкості передачі для еквівалента та реального кабелю типу "скручена пара". Для оцінки максимальної дистанції передачі по кабелю типу "скручена пара" більше 100 метрів необхідно доопрацювати його еквівалент, щоб він був порівнянний з реальним кабелем, що вимагає додаткового дослідження.

Аннотация – В работе проведен анализ передачи данных в промышленных сетях RS-485 и ProfiBus (ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS). Решались задачи определения надежности доставки данных на разных скоростях передачи и определения максимальной дистанции передачи по витой паре. В работе предложен алгоритм и программа исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары. Предложена схема исследования на базе одноплатных компьютеров BeagleBone Black. В ходе экспериментов были установлены рабочие скорости передачи эквивалента витой пары и реального кабеля. Для оценки максимальной дистанции передачи по витой паре более чем 100 метров необходимо доработать эквивалент витой пары, чтобы он был сопоставим с реальным кабелем, что требует дополнительного исследования.

Введение

Современные программируемые логические контроллеры (ПЛК) или модули расширения, подключаемые к ПЛК, большинства производителей содержат интерфейс RS-485 в качестве средства организации территориально-распределенной системы сбора данных и управления. RS-485 стал основой для создания целого семей-

ства промышленных сетей (LanDrive, ProfiBus DP, ModBus), широко используемых в промышленной автоматизации. В статье наряду с RS-485 рассматриваются Profibus сети. Следует отметить, что в сети ProfiBus поддерживаются три стандартных протокола передачи данных – ProfiBus-DP, ProfiBus-PA и ProfiBus-FMS. ProfiBus-DP – протокол скоростного циклического обмена данными между ведущим и ведомыми устройствами системы распределенного ввода-вывода. ProfiBus-PA – протокол скоростного обмена данными между ведущим DP-устройством и приборами «полевого» уровня, а ProfiBus-FMS – протокол обмена данными между системами автоматизации. RS-485 используется как физический уровень для ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS, поэтому в работе рассматривались только эти два протокола.

В научных работах последних лет [1-28] рассматриваются различные вопросы функционирования промышленных сетей и построения обмена информацией в автоматизированных системах управления. К таковым относятся: диагностирование обмена информацией, задачи применения эквалайзеров в цифровых кабельных интерфейсах, исследования передачи данных по витой паре в промышленных сетях, построение математических моделей витой пары радиочастотного кабеля объекта управления и другие вопросы функционирования промышленных сетей, с которыми приходится сталкиваться при разработке системы автоматизации и управления.

В промышленных сетях RS-485 и ProfiBus (ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS) в качестве среды распространения используется экранированная витая пара. При построении распределённых систем управления возникает актуальная задача оценки максимальной дистанции передачи по витой паре, а также надежности доставки данных на разных скоростях передачи. Целью данной работы является исследование передачи данных по витой паре в промышленных сетях RS-485 и Profibus для определения уровня надежности доставки данных на разных скоростях передачи и максимальную дальности передачи. В данной работе задача исследования передачи данных по витой паре в промышленных сетях RS-485 и Profibus решена с помощью применения эквивалентных схем и проведения реальных экспериментов.

1. Анализ особенностей работы промышленных сетей RS-485 и Profibus

1.1. Анализ передачи данных по RS-485

RS-485 является полудуплексной многоточечной сетью [1]. К одной линии возможно подключение нескольких передатчиков и приемников, причем в любой момент времени активен только один передатчик. Сигналы RS-485 являются дифференциальными, передача данных идёт по двум линиям – А и В, в схемах сопряжения с персональным компьютером (ПК) возможно применение адаптеров (драйверов) под Com-порт (рис.1) или USB (рис.2).

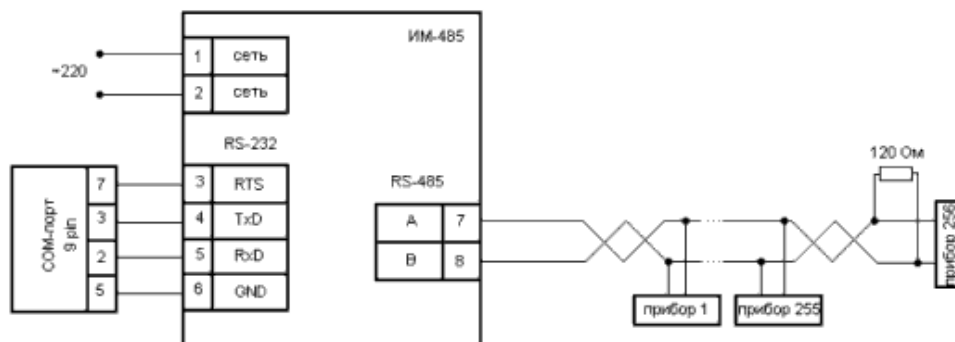


Рис. 1. Схема подключения линии RS-485 к ПК с использованием адаптера для Com-порта

В адаптерах для взаимодействия с линиями RS-485 чаще всего применяют микросхему ADM2485 [2, 6, 7], которая представляет собой изолированный, высокоскоростной передатчик RS-485 с интегрированным драйвером трансформатора. Если гальваническая развязка не требуется, то применяют преобразователи интерфейсов UART- RS-485 на базе микросхемы MAX485 (рис. 3). Реализация USB-UART преобразования, как правило, осуществляется на базе микросхем MCP2200, FT232RL или CH340G [3, 6].

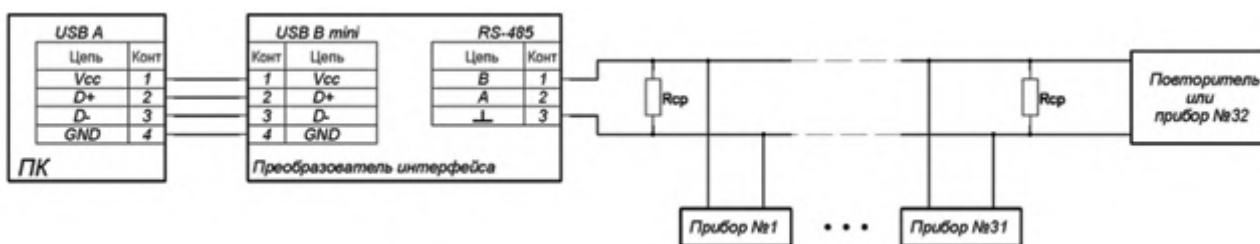


Рис. 2. Схема подключения линии RS-485 к ПК с использованием адаптера под USB

В момент отсутствия активного передатчика на шине уровень сигнала в линиях не определен. Для предотвращения ситуации, когда разница между входами А и В меньше 200мВ (неопределённое состояние), иногда применяется смещение с помощью резисторов или специальной схемы. Если состояние линий не определено, то приёмники могут принимать сигнал помехи. Некоторые протоколы предусматривают передачу служебных последовательностей для стабилизации приёмников и уверенного начала приёма [3].

Как видно из рис. 3 управляющие входы DE и RE объединяются, что приводит к автоматическому отключению приемника во время работы передатчика.

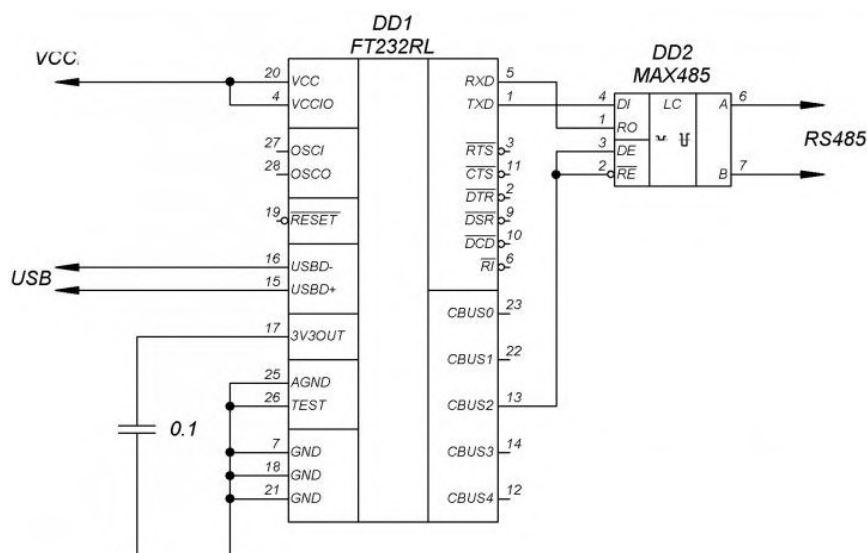


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная реализации USB-UART-RS485 адаптера без гальванической развязки на базе микросхемы MAX485

Устройства, соединенные линиями RS485, зачастую находятся на большом расстоянии друг от друга, поэтому обычно требуется гальваническая развязка (рис. 4), функции которой – разрыв общей "земляной" цепи, защита всей системы от высоковольтных переходных процессов, уменьшение помех и искажений сигналов, а также увеличение степени электробезопасности [7].

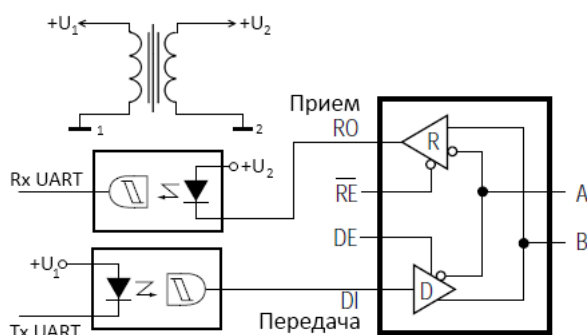


Рис. 4. Схема типовой гальванической развязки для RS485

При проектировании систем автоматизации и управления с использованием стандарта EIA RS-485, следует учитывать ряд весьма важных факторов, среди которых, в первую очередь, должны рассматриваться следующие:

- количество передатчиков и приемников;
- скорость передачи данных;
- способ объединения устройств с RS-485;
- максимальная протяженность линии связи;
- качество линии связи [8].

Так как в основе RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных, то между двумя проводами витой пары всегда есть разность потенциалов. Суть дифференциальной передачи данных представлена на осциллограмме (рис. 5) и заключается в передаче одного сигнала по двум линиям, причем по одной линии (А) идет оригинальный сигнал, а по другой (В) – его инверсная копия. Таким образом, если на одной линии логическая "1", то на другой логический "0" и наоборот.

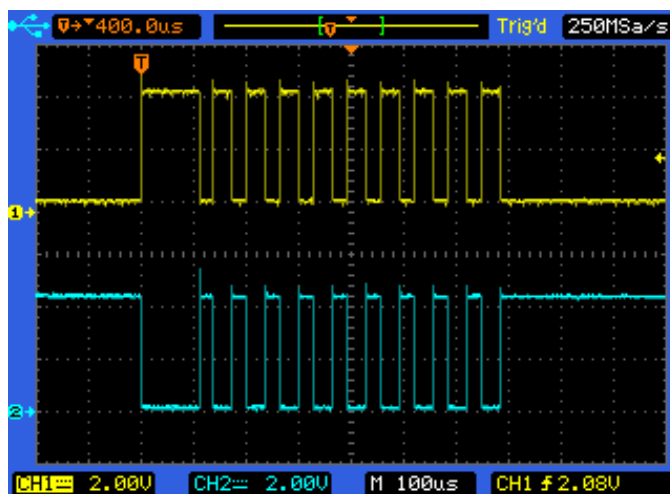


Рис. 5. Осциллограмма дифференциальной передачи данных линий А (CH1) и В(CH2)

1.2. Анализ передачи данных по сети Profibus

Промышленные сети Profibus построены в соответствии с многоуровневой моделью ISO 7498 – OSI (табл. 1),

Таблица 1. Построение сети Profibus в соответствии с моделью OSI

№	Название уровня	Profibus DP	Profibus FMS	Profibus PA
7	Прикладной	-	Fieldbus Message Specification (FMS)	-
6	Представления	-	-	-
5	Сеансовый	-	-	-
4	Транспортный	-	-	-
3	Сетевой	-	-	-
2	Канальный (передачи данных)	FDL	FDL	IEC 1158-2
1	Физический	RS-485, оптоволоконный интерфейс	RS-485, оптоволоконный интерфейс	Интерфейс IEC 1158-2

Стандарт Profibus был первоначально принят в Германии в 1987 году, затем, в 1996 году, он стал международным (EN 50170 и EN 50254) [4, 24].

На физическом уровне Profibus DP и FMS используют стандарт RS-485 при скорости передачи до 12 Мбит/с [10] и с размерами сегментов сети до 32 устройств [24]. Количество устройств можно увеличить с помощью повторителей интерфейса [6, 7].

Сетевой кабель для Profibus должен иметь волновое сопротивление от 135 до 165 Ом при погонной емкости не более 35 пФ/м, площади поперечного сечения проводников более 0,34 мм² и погонном сопротивлении не более 110 Ом/км [11, 24]. Кабель должен иметь одну или две витые пары с медным экраном в виде оплетки или фольги.

Для всех версий Profibus существует единый протокол доступа к шине. Этот протокол реализуется на 2 уровне модели ISO, который называется в Profibus – FDL(Fieldbus Data Link). Формат телеграммы уровня 2 (рис. 6) способствует большей безопасности передачи. Вызывающая телеграмма имеет расстояние Хемминга HD (Hamming Distance) равное 4. При HD = 4 может быть одновременно распознано до 3-х ошибок в фальсифицированных битах телеграммы данных. Это достигается благодаря применению особых стартового и завершающего знаков телеграммы, постоянно скользящей синхронизации, биту четности и контрольному байту [24].

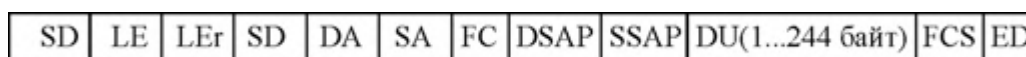


Рис. 6. Структура телеграммы Profibus

Поля телеграммы Profibus имеют следующее содержание:

- SD - стартовый разделитель. Используется для указания начала телеграммы и ее формата. Имеется четыре типа разделителей для телеграмм запроса и ответа и один тип для короткого уведомления. Короткое уведомление имеет поле SD, но не в начале телеграммы;
 - LE - длина передаваемых данных (DA+SA+FC+DSAP+SSAP+DU);
 - LEr - повторение поля LE с целью его резервирования;
 - DA - адрес устройства-получателя телеграммы;
 - SA - адрес отправителя;
 - FC - код типа телеграммы (запрос, уведомление, ответ, диагностические данные, тип устройства - мастер или ведомый, приоритет, уведомление);
 - DSAP - устройство-получатель которое использует это поле чтобы определить, какой тип сервиса нужно выполнить;
 - SSAP - COM порт отправителя;
 - DU - данные длиной от 1 до 244 байт;
 - FCS - контрольная сумма телеграммы (сумма значений полей DA+SA+ FC+DU, по модулю 255);
 - ED - признак конца [24].
- Таким образом, передачу данных в промышленной сети Profibus предоставляют три возможных варианта передачи на физическом уровне:
- RS 485 передача для Profibus-DP и Profibus-FMS;

- IEC 1158-2 для ProfiBus-PA;
- оптоволоконный кабель.

Так как целью данной работы является исследование дальности передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары, поэтому далее будем рассматривать только ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS. Если подключить к системе ProfiBus больше, чем 32 устройства [12], то нужно использовать несколько шинных сегментов. Эти отдельные шинные сегменты, каждый максимум с 32-я устройствами, должны быть соединены друг с другом через повторитель (усилитель мощности) [24]. Как правило, повторитель-соединитель реализуется как восстановитель сигнала [24], поэтому особый практический интерес представляет установление скорости и длины линии без использования повторителей.

2. Эквивалентная модель витой пары

Электрические свойства витой пары полностью характеризуются ее первичными параметрами: сопротивлением по постоянному току R , индуктивностью L проводников, емкостью между проводниками C , проводимостью изоляции G [23, 27]. В упрощенной эквивалентной схеме витой пары проводимостью изоляции G пренебрегают (рис. 7).



Рис. 7. Упрощенная эквивалентная схема витой пары

Реактивные параметры L и C ограничивают ее амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в целом, а параметры C и R , возрастающие с частотой, приводят к завалу высокочастотной (ВЧ) части спектра передаваемого сигнала [23]. Активное сопротивление R постоянному току зависит от материала проводника, его геометрических размеров, и его температуры. По распространенному стандарту EIA/TIA-568A это значение не должно превышать 19,2 Ом на короткозамкнутом шлейфе длиной в 100 метров при температуре 20° С. Эту величину можно легко измерить простым омметром. С увеличением частоты сигнала, активное сопротивление растет. Это обусловлено прохождением тока в основном по части, обращенной к другому проводнику (эффект близости). Вытеснение тока к поверхности проводника (скин-эффект) для проводов тоньше 0,8 мм мало замечено, но некоторое минимальное влияние на уменьшение эффективного сечения оно тоже оказывает.

Как отмечено в работе [23], физически затухание кабеля определяется уровнем поглощения в диэлектрике витой пары, уровнем излучения, нагрузочной емкостью и скин-эффектом. Затухание можно оценить, используя эквивалентную схему витой

пары (рис. 3), которая рассматривалась в работах [23, 25, 27, 28, 30] и описана в стандарте IEEE. 802.3 [29]. Согласно рекомендациям, отмеченным в [23], номиналы элементов можно скорректировать в зависимости от длины витой пары.

Создание адекватной модели линии является не тривиальной задачей, над которой работали и продолжают работать отечественные и зарубежные ученые [23, 24-28, 30]. Эквивалентная схема (рис. 8) является также идеализированной, хотя и наиболее часто встречаемой в литературе.

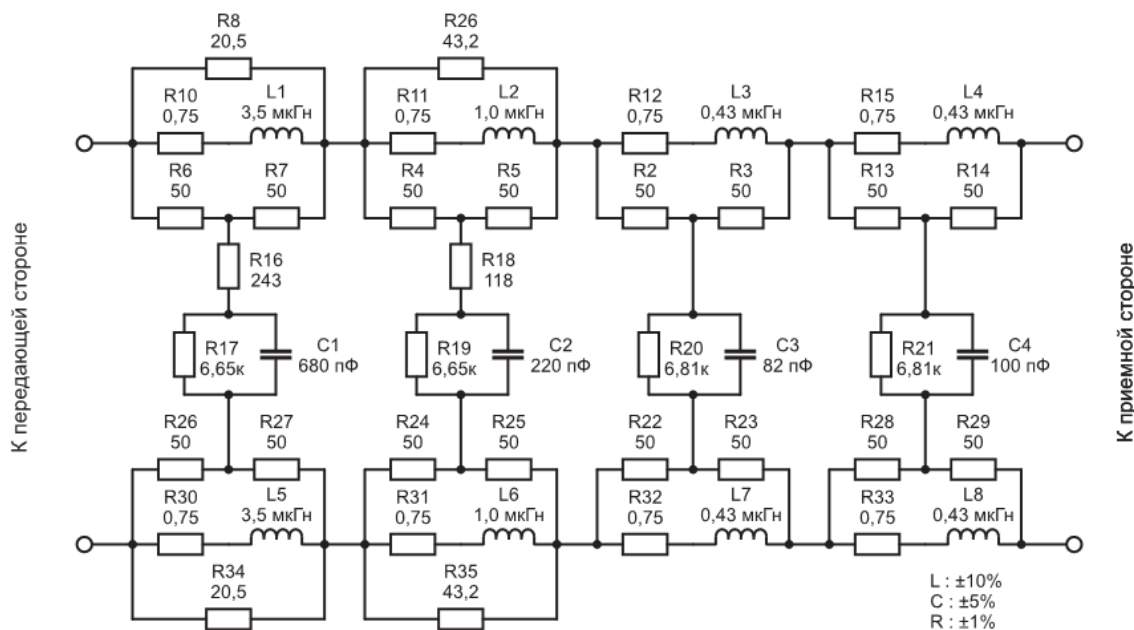


Рис. 8. Эквивалентная схема витой пары согласно IEEE 802.3 для наихудшего случая и расстояния, равного 100 м

Необходимо отметить, что предложенная в стандарте IEEE 802.3 [29] эквивалентная схема замещения витой пары (рис. 8) является не точной моделью отрезка витой пары, так как представляет собой RLC-цепь с сосредоточенными параметрами. Ввиду вышесказанного, указанная схема не может отображать все характеристики цепи с распределенными параметрами, например, данный прототип не отражает такую величину как время задержки сигнала при его прохождении через отрезок витой пары длиной 100 м [31].

Следовательно, для исследования дальности передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары возьмем эквивалентную схему согласно IEEE 802.3 [29] для наихудшего случая и расстояния равного 100 м. На базе эквивалентной схемы возникает задача разработки тестового стенда. На основании сопоставления результатов передачи данных RS-485 и ProfiBus через тестовый стенд и реальную витую пару можно будет судить об адекватности схемы и путей ее доработки для учета распределенных параметров.

3. Разработка тестового стенда исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары

Как было отмечено в разделах 1.1 и 1.2 данной работы, для передачи данных по сетям RS-485 и ProfiBus (ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS) используется кабель типа витая пара, эквивалентная схема которой была рассмотрена в разделе 2. Для тестирования передачи данных, а именно их дальности и скорости, необходимо провести тест типа «ring-pong», т.е. устройство 1 должно посылать данные через эквивалент витой пары или реальную витую пару, а устройство 2 должно принимать эти данные и отправлять назад устройству 1. Следовательно, тест типа «ring-pong» будет завершен (пройден), если устройство 1 получит данные, отправленные им в начале теста и прошедшие через эквивалент или реальный кабель.

Учитывая, что RS-485, ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS используют для передачи линии А и В [4, 6], а сама промышленная сеть может быть расположена далеко от источников питания, предлагается использовать два одноплатных компьютера BegelBoneBlack [21], которые можно запитать автономно от аккумулятора или другого портативного источника питания. Следовательно, схема подключения тестового стенда будет содержать (рис. 9):

- два одноплатных компьютера BegelBoneBlack;
- микросхему ADM2485;
- эквивалентную схему витой пары для расстояния 100 м.



Рис. 9. Схема подключения тестового стенда для исследования передачи данных по сетям RS-485 и ProfiBus

Микросхема ADM2485 была выбрана, так как имеет полудуплексный изолированный приемопередатчик RS-485 (рис. 10) и такие особенности реализации:

- интегрированный генератор для управления внешним трансформатором;
- возможность применения в сетях PROFIBUS;
- соответствует спецификациям ANSI/TIA/EIA RS-485-A-98 и ISO 8482:1987(E) ;
- поддерживает скорость передачи данных до 16 МБит/с;
- ослабление синфазного сигнала составляет не менее 25 кВ/мкс;
- работает от 3-вольтового и 5-вольтового источников питания;
- позволяет подключить до 50 приемопередатчиков на одну шину.

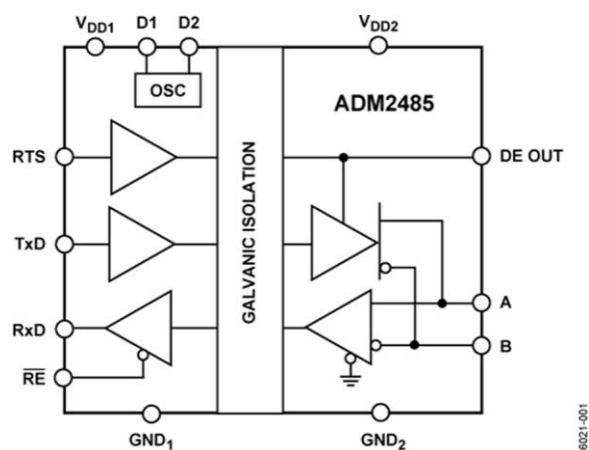


Рис. 10. Схема изолированного высокоскоростного приемопередатчика RS-485, реализованная в микросхеме ADM2485

Тестовый стенд (рис. 9) имеет одно ограничение: в случае использования платы с эквивалентной схемой он будет работать адекватно только в одном направлении (см. рис. 8). Для проверки в обратном направлении необходимо изменить отправителя на получателя. В случае использования реального кабеля типа «витая пара» эти ограничения снимаются.

4. Разработка алгоритма и программы исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары

4.1. Исследования возможности применения ядра ОС Linux (Debian)

BeagleBone Black (BBB) представляет собой одноплатный компьютер на базе процессорного ядра ARM. Он относится к классу одноплатных компьютеров с поддержкой интерфейсов USB Host, USB Device, Ethernet, HDMI и поддержкой карт памяти формата SD или microSD. В одноплатном компьютере BBB применяется процессор от компании Texas Instruments серии Sitara AM3359AZCZ100 с тактовой частотой в 1ГГц, который содержит в своем составе вычислительное ядро Cortex-A8 и графический ускоритель SGX530. На плате установлено 512 Мб оперативной памяти DDR3L, Flash память eMMC объемом в 2 Гб, на которой установлена операционная система Angstrom Linux. Для загрузки другого дистрибутива Linux или ОС Android можно использовать карту памяти формата microSD, подключаемую к соответствующему слоту на плате. Одноплатный компьютер BBB не способен генерировать дифференциальные сигналы, необходимые для RS-485, но как было отмечено ранее, есть достаточное количество RS-485 микросхем-трансиверов которые могут конвертировать сигнал между RS-485 трансивером и последовательными уровнями TTL,

приходящими по UART. Как было описано в разделах 1 и 2 данной работы, для взаимодействия с приемопередатчиком RS-485 необходима поддержка не только интерфейса UART, но и взаимодействие с управляющими входами DE и RE (рис. 3). Встроенные UART в процессорах серии ARM AM335x лишены этой возможности [35], поэтому RE/DE сигнал должен быть создан в программном обеспечении.

В ходе анализа программной реализации RE/DE сигналов в драйверах ОС Linux Debian была найдена модифицированная версия OMAP-драйвера для подключения полудуплексного RS-485 трансивера, который подключается к UART4 одноплатного компьютера BBB. Модифицированная версия OMAP-драйвера последовательного порта меняет макросы для элемента флагов, для того, чтобы с помощью драйвера в BBB выводы GPIO создавали RE/RE сигналы и добавляли еще один элемент для управления.

Для получения нужного номера GPIO можно использовать код:

```
struct serial_rs485 {
    __u32 flags; /* RS485 feature flags */
    #define SER_RS485_ENABLED (1 << 0) /* If enabled */
    #define SER_RS485_RTS_ON_SEND (1 << 1) /* Logical level for
        RTS pin when
        sending */
    #define SER_RS485_RTS_AFTER_SEND (1 << 2) /* Logical level for
        RTS pin after sent*/
    #define SER_RS485_RX_BEFORE_TX (1 << 3)
    #define SER_RS485_USE_GPIO (1 << 5)
    __u32 delay_rts_before_send; /* Delay before send (milliseconds) */
    __u32 delay_rts_after_send; /* Delay after send (milliseconds) */
    __u32 gpio_pin; /* GPIO Pin Index */
    __u32 padding[4]; /* Memory is cheap, new structs
        are a royal PITA .. */
};
```

Таким образом, чтобы использовать режим RS-485 с применением одноплатного компьютера BeagleBone Black (BBB) необходимо следовать стандартным шагам в Linux системах с помощью модифицированных структур OMAP-драйвер. В итоге, возможно использовать язык программирования Python для реализации тестирования передачи данных по сетям RS-485 и ProfiBus.

4.1. Разработка алгоритма исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары

Алгоритм исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары необходимо разделить на две составляющие – алгоритм настройки и инициализации (рис. 11) и алгоритм тестирования.

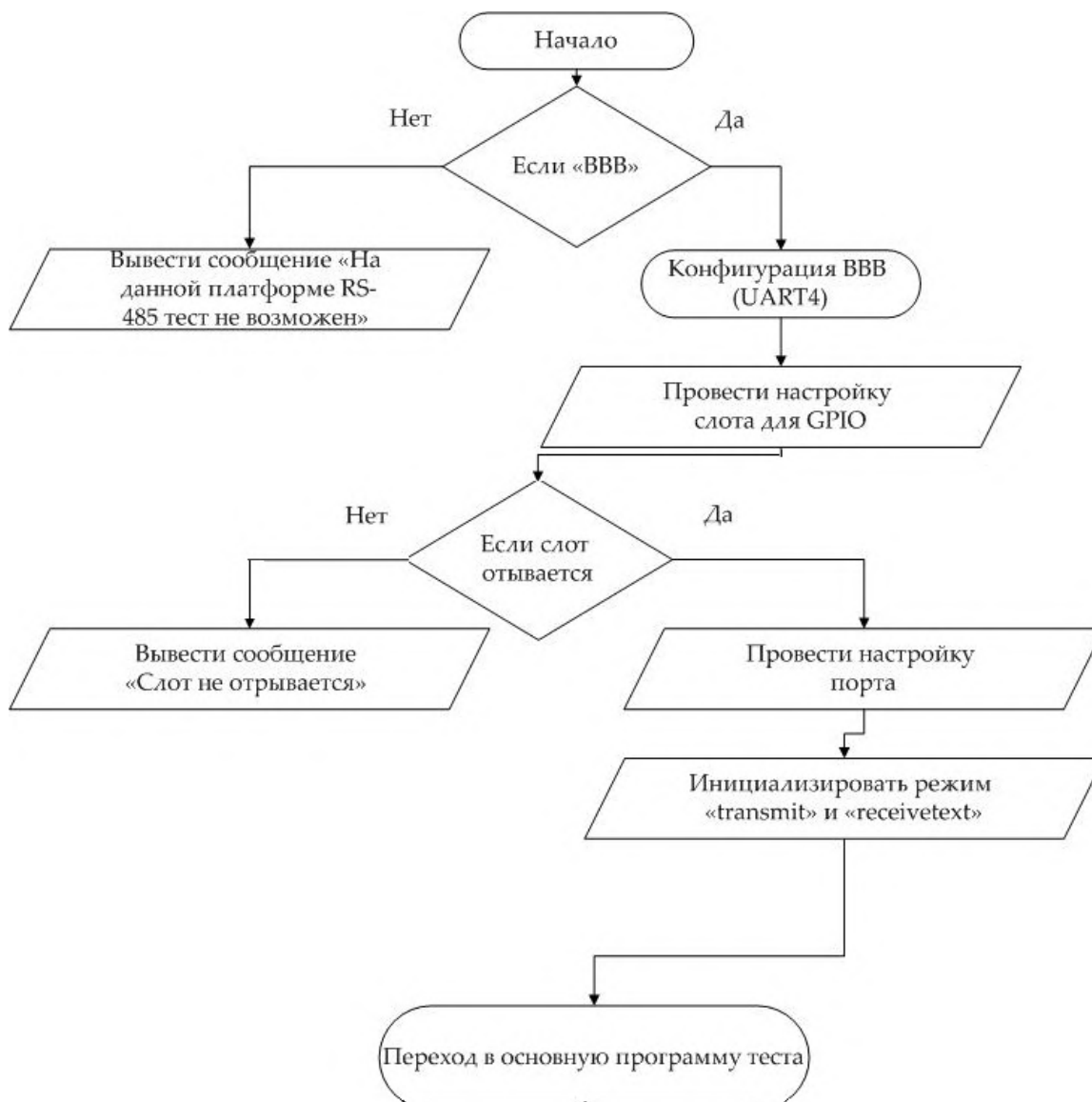


Рис. 11. Алгоритм настройки и инициализации исследования передачи данных для промышленных сетей с использованием одноплатного компьютера BBB

Для составления алгоритма тестирования рассмотрим более подробно работы входов RE/DE в микросхеме приемопередатчика RS-485. Входы RE/DE требуют высокий уровень, чтобы включить трансивер и низкий уровень, чтобы включить приемник. Некоторые UART могут быть переведены в режим RS-485, где они автоматически генерируют RE/DE сигнал, используя свой пин-RTS. Как было отмечено ранее, в драйверах для BBB такая возможность отсутствует. Этот режим, по существу, переворачивает стандартный сигнал RTS, который, как правило, становится достаточно низким при передаче.

Таким образом, алгоритм тестирования будет состоять из таких программных элементов:

- transmit mode (t) - непрерывная передача пакетов;
- ping mode (p) - посылка пакетов;

- pong mode (o) - прием пакета и его передача назад получателю;
- receive mode (r) - непрерывное получение пакетов.

Режим «ping mode» реализует полноценную передачу данных. Режим «pong mode» реализует полноценный прием пакета и его передачу назад получателю. Режимы «transmit mode» и «receive mode» используются для проверки передачи данных с передачей тестовых пакетов, но без их обработки.

4.3. Разработка программы исследования передачи данных

Согласно алгоритму и режимам тестирования, отображенных в разделе 4.2, была разработана программа на языке Python для реализации тестирования передачи данных по сетям RS-485 и ProfiBus. Для полноценной работы теста и всех режимов тестирования необходимо установить следующие модули Python, а также провести их импорт:

```
import serial, fcntl, struct, time, os, getopt, sys, platform
```

В связи с большим объемом листинга программы, и тем, что основной задачей работы было исследование передачи данных, листинг программы не приводится.

5. Экспериментальное исследование передачи данных в промышленных сетях

Для определения надежности доставки данных на разных скоростях передачи применялись условия, соответствующие режимам работы ADM2485 [36, 38]:

- 300 бит/с;
- 600 бит/с;
- 1200 бит/с;
- 2400 бит/с;
- 4800 бит/с;
- 9600 бит/с;
- 14400 бит/с;
- 19200 бит/с;
- 28800 бит/с;
- 38400 бит/с;
- 57600 бит/с;
- 115200 бит/с;
- 230400 бит/с;
- 460800 бит/с;
- 921600 бит/с;
- 1843200 бит/с;
- 3000000 бит/с;
- 3686400 бит/с.

Данные скорости были проверены на эквиваленте витой пары и реальном отрезке экранированной витой пары длиной 100 метров согласно схеме рис. 9. Ошибки в передаче пакетов начинаются со скорости 230400 бит/с и наблюдаются дальше с увеличением частоты. В отличие от эквивалента витой пары, реальный кабель показал лучший результат и ошибки возникали на скорости от 460800 бит/с.

Для оценки максимальной дистанции передачи по витой паре более 100 метров необходимо доработать эквивалент витой пары, чтобы он был сопоставим с реальным кабелем, что требует дополнительного исследования.

Выводы

В работе проведен анализ передачи данных в промышленных сетях RS-485 и ProfiBus (ProfiBus-DP и ProfiBus-FMS), которые используются при построении распределённых систем управления и контроля. Была подробно рассмотрена передача данных по RS-485 и Profibus. Также решалась задача определения надежности доставки данных на разных скоростях передачи и определения максимальной дистанции передачи по витой паре. Данные задачи решались с применением эквивалентных схем и проведением реальных экспериментов. В работе предложен алгоритм и программа исследования передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары. Общий алгоритм исследования процессов передачи данных предлагается осуществлять на базе двух алгоритмов – алгоритма настройки и инициализации и алгоритма тестирования. Также предложена схема исследования на базе одноплатных компьютеров BeagleBone Black. Экспериментальное исследование показало, что для 100 метрового эквивалента витой пары ошибки в передаче начинаются со скорости 230400 бит/с, а для реального кабеля – с 460800 бит/с. Для оценки максимальной дистанции передачи по витой паре длиной более 100 метров необходимо доработать ее эквивалент, чтобы он был сопоставим с реальным кабелем, но это предполагает проведение дополнительных исследований.

Таким образом, впервые проведены исследования передачи данных в промышленных сетях RS-485 и ProfiBus с применением одноплатного компьютера BeagleBone Black. Определены максимальные скорости передачи данных для реального кабеля и его эквивалента. Предложенные алгоритмы и программа исследования процессов передачи данных для промышленных сетей на базе витой пары могут быть применимы к кабелю любой длины.

Список литературы:

1. Hui-juan Jia. Research on the Technology of RS485 over Ethernet / Hui-juan Jia, Zheng-hui Guo // International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE). – 2010. – P. 1–3.
2. Преображенский Н. Б. Комплексование MODBUS и PROFIBUS в промышленных сетях / Н. Б. Преображенский, Ю. А. Холопов., Ч. Н. Дам // Новый Университет. Серия: Технические Науки. – 2014. – №12 (34).– С. 52-56.

3. Suk L. Integration of mobile vehicles for automated material handling using Profibus and IEEE 802.11 networks / Suk Lee, Kyung Chang Lee, Man Hyung Lee, F. Harashima//IEEE Transactions on Industrial Electronics.– 2002.– Vol. 49, No. 3.– P. 693-701.

4. Kyung C. L. Integrated network of Profibus-DP and IEEE 802.11 wireless LAN with hard real-time requirement / C. L. Kyung, Suk Lee // 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No.01TH8570). – 2001.– Vol. 3.– P. 1484-1489.

5. Mossin E. A. Automatic Diagnosis for Profibus Networks / Journal of Control, Automation and Electrical Systems // E. A. Mossin, D. Brandão, G.S. Sestito.– 2016.– Vol. 27, Issue 6. – P. 658–669.

6. Овчинников А. Новое для привычного стандарта: Драйверы RS-485 от Maxim // Новости электроники. – 2016.– № 11.– С. 9–13.

7. Фурман Д. Интерфейс rs485 с гальванической развязкой от analog devices / Д. Фурман //Компоненты и технологии. – 2004.– № 43.– С. 128-130.

8. Langmann R. "Workshop: The TATU Lab & smart education" / R. Langmann, Y. Makarova, L. Rojas-Peña, P. Galkin, I. Klyuchnik, V. Voropaeva, V. Pozepaev, L. Zinyuk, R. Skrypyuk, E. Shaporina, V. Shaporin, V. Shapo, S. Gorb // 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV).– Madrid, 2016.– P. 400-402.

9. Lemeshko O. Dynamic presentation of tensor model for multipath QoS-routing / O. Lemeshko, O. Yeremenko // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET).– 2016, IEEE.– P. 601–604.

10. Zhao L. Optimized design method for enhancing reliable communication of rs485 fieldbus / L. Zhao, J.L. Zhang // Dalian ligong daxue xuebao.– 2015.– Vol. 55, Issue 4. – P. 393-398.

11. Тягульская Л.А. Организация двусторонней связи с микроконтроллерами по интерфейсу rs-485 / Л.А. Тягульская, И.А. Дубинин // International Scientific Review. – 2016.– № 1 (11).- С. 34-36.

12. Jinsoo Han Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC / Jinsoo Han, Chang-sic Choi, Wan-ki Park, Ilwoo Lee, Sang-ha Kim// IEEE Transactions on Consumer Electronics.– 2014.– Vol. 60, No. 2.– P. 198-202.

13. Галкин П.В. Модель и алгоритм управления информационными потоками в беспроводной сенсорной сети / П.В. Галкин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка.– 2015.– №1. – С. 17-32.

14. Агеев Д.В. Применение модели в виде многослойного графа при параметрическом синтезе инфокоммуникационных систем / Д.В. Агеев, Фуад Вехбе // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PIC S&T- 2013): Сборник научных трудов первой международной научно - практической конференции, Харьков 9-11 октября 2013 г. / М-во образования и науки Украины, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.– Харьков: ХНУРЭ, 2013.– С. 96–98.

15. Галкин П.В. Исследование модифицированных муравьиных алгоритмов оптимизации сбора информации в беспроводных сенсорных сетях / П.В. Галкин // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014.– №4.– С. 74-82.

16. Галкин, П. В. Алгоритм управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети / П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014.– Т. 6, № 3(72).– С. 53–63.

17. *Peng Fei Hu* Implementation of the Transmission Protocol of Non-Polar RS485 Based on FPGA [Text] / P. F. Hu, Y. X. Yuan, Z. J. Qu, X. P. Jiang, K. S. Yu // Applied Mechanics and Materials, Chapter 7: Communication and Information Technology. – 2015. – Vol. 719-720. – P. 669-673
18. *Siming Ma* Design and implementation of dynamic characteristics tracking system of maglev train based on real-time target and communication interface / Siming Ma, Qijun Chen // Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on. – 2015. – Lijiang, 2015. – P. 3009-3013
19. *Zhang Chuan Lian* Distributed Control System Design for Sorting Parts System Based on PC and PLC / Zhang Chuan Lian, Huang Dazhi, Zhou Qinggui, Chong, Kil To // Advanced Science Letters. – 2015. – Vol. 21, No. 12. – 3 3672-3676(5).
20. *Wang D. G.* An Improved Approach to RS485-Based Long-Distance High Speed Telemetry for Industrial Sensor Data [Text] / D. G. Wang, C. Li, T. H. Ding // Applied Mechanics and Materials, Chapter 3: Measurement and Instrumentation, Monitoring and Detection Technologies, Fault Diagnosis. – 2014. – Vol. 543-547. – P. 1013-1017
21. *Nannan He* Experience of teaching embedded systems design with BeagleBone Black board / Nannan He, Ying Qian, Han-way Huang // 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). – 2016, Grand Forks. – P. 0217-0220.
22. *Чостковський Б.К.* Математическа модель витой пары радиочастотного кабеля об'єкта управління / Б.К. Чостковський, Д.А. Смородинов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2008. – № 1 (16). – С. 113–118.
23. *Адамов Ю.* Эквалайзеры в цифровых кабельных интерфейсах / Ю. Адамов, Я. Губин, О. Сомов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2016. – №3. – С. 70-73.
24. Siemens AG Сети SIMATIC NET, PROFIBUS-DP // Руководство Siemens AG, Департамент автоматизации и приводов, Промышленные системы автоматизации, Нюрнберг, 2001. – 202 с.
25. *Левинский В. М.* Диагностирование обмена информацией по сети PROFIBUS при построении распределенных систем управления / В. М. Левинский, М.В. Левинский // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – №75. – С. 101-105.
26. *Арутюнян А.Р.* Построение математической модели передачи данных по интерфейсу rs-485 для промышленных сетей / А. Р. Арутюнян, А. Л. Масюк, С.Р. Арутюнян // Наукові праці ДонНТУ, серія «Машинобудування і машинознавство». – 2006. – С. 117-123.
27. *Горященко К.Л.* Класичні моделі провідникових ліній передач / К.Л. Горященко, К. Л. Ногыaschenko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №. 3. – С. 98-101.
28. *Горященко К. Л.* Огляд класичних моделей провідникових регулярних ліній передачі // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – №. 5. – С. 247-250.
29. IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks. Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications: IEEE Std 802.3. – 2002. – 1538 p.
30. *Павликевич М.Й.* Математична модель багатопровідного кабеля типу "скручена пара" // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2011. – № 705. – С. 112-118.
31. *Рожновский М. В.* Исследования витой пары при эксплофункциональных воздействиях // Наукові праці ОНАЗ ім. ОС Попова. – 2010. – №. 2. – С. 93-101.

32. *Vladyko A.* Using the IEEE 802.11 Family of Standards for Communication Between Robotic Systems. / A. Vladyko, A. Paramonov, R. Kirichek, A. Koucheryavy // 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering (AIIE2016), Advances in Intelligent Systems Research. – 2016. – Vol. 133. – P. 153-157.

33. *Sita I. V.* Universal Communication Node for Building Automation Systems / I. V. Sita, P. Dobra // Applied Mechanics and Materials.– Trans Tech Publications.– 2013.– Vol. 436.– P. 435-444.

34. *Birkett R.* Enhancing Real-time Capabilities with the PRU // Embedded Linux Conference. – 2015. – P. 1-39.

35. *Bucquet S.* Accessing the IO ports of the Beaglebone Black with Python // Linux journal.– 2014.– Vol. 2014, Issue 246.– Article No. 3.

36. *Instruments T.* AM335x ARM R Cortex™-A8 Microprocessors (MPUs): Technical Reference Manual. – 2013.– 4728 p.

37. *Coley G.* Beaglebone Rev A6 system reference manual. – Obtenido, 2012. – 92 p.

38. *Marais H.* RS-485/RS-422 circuit implementation guide. – Analog Devices: Norwood, MA, App. Note AN-960, 2008. – 12 p.