

УДК 65.011.56
DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-28-38

Система мониторинга протяженных промышленных объектов

В. В. Колодей, П. А. Разумовский, С. Р. Шакиров

*Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Представлены программно-аппаратный комплекс и реализованный на его основе экспериментальный образец системы мониторинга протяженных объектов на примере ленточного конвейера. Предложен метод адресации дискретных датчиков в двухпроводных линиях. Описаны алгоритмы работы системы мониторинга, приведены результаты экспериментов на специально созданном имитационном стенде.

Ключевые слова

промышленная безопасность, АСУ ТП, мониторинг состояния оборудования

Для цитирования

Колодей В. В., Разумовский П. А., Шакиров С. Р. Система мониторинга протяженных промышленных объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 4. С. 28–38. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-28-38

Monitoring System of Extended Industrial Facilities

V. V. Kolodey, P. A. Razumovskiy, S. R. Shakirov

*Federal Research Center for Information
and Computational Technologies
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Priority is given to ensure safety and efficiency of technological processes in hazardous industries, especially in mining operations. Such factories utilize enormous amount of safety sensors. Triggering any one of them stops operations both locally and globally. For example, a single belt conveyor is fitted with up to a hundred sensors and reaches few kilometers length. It is very important to quickly localize a position of a triggered safety sensor to proceed with elimination of an accident.

The purpose of this work is to create a hardware-software monitoring system of extended objects (f.e. belt conveyor), which detects a triggering of a two-wire safety line. According to the purpose of this work the following were developed and tested: a physical control model that replicates the triggering of safety sensors, a hardware architecture of monitoring system, a mathematical model of separate nodes of devices, electrical schematics, and a device prototype. A function algorithms and software architectures for each device were developed and tested. As a result an experimental system prototype was developed with accordance to the rules of hazardous environment.

On a basis of a monitoring system and a physical control model a simulation bench was developed. By results of concluded experiments following system specifications were deducted: safety sensor triggering detection in less than 100 ms, an address definition from 1 up to 3 simultaneously triggered safety sensors, definition of the type of accident.

Created monitoring system may be used to control a variety of industrial extended objects, in particular in gas- and dust-hazardous environment, using discrete safety sensors.

Keywords

industrial safety, industrial control systems, monitoring of equipment status

For citation

Kolodey V. V., Razumovskiy P. A., Shakirov S. R. Monitoring System of Extended Industrial Facilities. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 4, p. 28–38. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-28-38

© В. В. Колодей, П. А. Разумовский, С. Р. Шакиров, 2020

Введение

Обеспечение безопасности и эффективности протекания технологических процессов является безусловным приоритетом для любого промышленного предприятия. Наиболее остро данная проблема стоит на особо опасных производствах, в частности горнодобывающих предприятиях, к которым относятся и шахты. Данная категория объектов снабжена огромным количеством датчиков безопасности, срабатывание любого из них приводит не только к локальной остановке оборудования, но зачастую и всего производства. Причина срабатывания датчиков может быть любая: превышение концентрации метана, пожар, неисправность оборудования и др. Для оперативного определения и устранения причин аварийной ситуации крайне важно знать местоположение сработавшего датчика.

Среди всего многообразия аварийных датчиков на угольных шахтах особое место занимают дискретные датчики безопасности ленточных конвейеров – кабель-тросовые выключатели (КТВ) и датчики контроля схода ленты (ДКСЛ)¹. Они отличаются простотой конструкции, надежностью и, ввиду того что конвейеры являются наиболее распространенным видом шахтового транспорта, массовостью применения. Длина одного магистрального конвейера, на котором установлены более сотни ДКСЛ и КТВ, может достигать нескольких километров, а общая протяженность всей транспортной цепочки шахты – нескольких десятков километров, при этом суммарное количество датчиков будет исчисляться тысячами². Срабатывание любого из этих датчиков приводит к остановке не только конкретного конвейера, на котором он установлен, но и всей транспортной ветки, являющейся для него источником груза. В стандартных схемах включения местоположение сработавшего датчика определяется системами автоматики с точностью до конвейера, определить же конкретный датчик представляется возможным лишь вручную путем визуального осмотра, для чего дежурному механику придется пройти пешком несколько километров и проверить не один десяток датчиков. На это потребуется не один час времени, в течение которого шахта или ее часть будет простаивать. Поэтому априорное автоматическое определение номера сработавшего датчика безопасности ленточного конвейера является крайне актуальной задачей с точки зрения эффективности производственных процессов.

Целью данной работы являлась разработка и создание программно-аппаратного комплекса и реализация на его основе экспериментального образца системы мониторинга протяженных промышленных объектов на примере ленточного конвейера с функцией определения адреса сработавшего датчика в двухпроводных линиях.

Обзор существующих методов адресации дискретных датчиков

В настоящее время все без исключения конвейерные линии оснащаются множеством систем защиты, в том числе процесс управления и запуска конвейеров производится дистанционно в автоматизированном режиме [1], что позволяет минимизировать влияние человеческого фактора.

Традиционно дискретные датчики безопасности ленточных конвейеров соединяются последовательно. Каждый датчик представляет собой нормально замкнутый контакт, который при аварии размыкает цепь, что приводит к экстренной остановке конвейера путем обесточивания двигателей и наложения тормозов. Как видно из схемы включения (рис. 1, а), все датчики являются равноправными, и автоматическое определение контроллером АСУ ТП номера сработавшего не представляется возможным.

Существующие методы определения позиции сработавшего дискретного датчика можно разделить по типу подключения – соединение звездой и применение дополнительной цифровой линии передачи данных. Соединение звездой является наиболее простым с технической

¹ ГОСТ Р 55154 – 2012. Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования. М., 2012. 28 с.

² Там же.

точки зрения и позволяет применять существующие типы датчиков (рис. 1, а). Топология данного соединения подразумевает подведение к каждому датчику своей собственной линии, что избавляет от возможных коллизий. Однако такой тип соединения обладает одним существенным недостатком – приходится использовать огромное количество шахтового кабеля, что с учетом его дороговизны делает модернизацию кабельной инфраструктуры шахты крайне затратной.

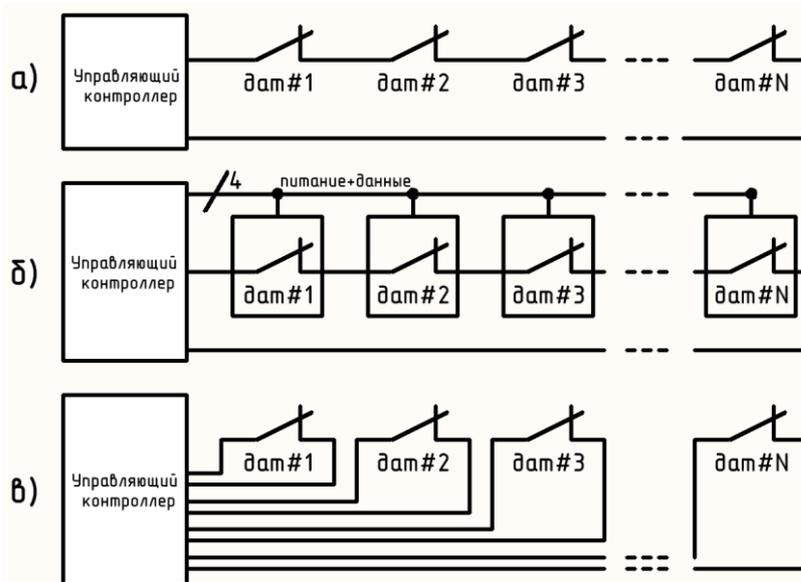


Рис. 1. Типы соединений дискретных датчиков безопасности
Fig. 1. Connection types of discrete safety sensors

Другой распространенный способ, заключающийся в использовании дополнительной линии цифровой передачи данных (рис. 1, б), например, RS-485, хоть и не требует столь большого количества кабеля, как в случае с соединением звездой, тем не менее его количество по сравнению с «традиционным» последовательным включением возрастает в два-три раза, в зависимости от схемы подключения. Также приходится использовать либо дополнительные адресные устройства вместе с существующим датчиками, либо заменять сами датчики на новые с уже встроенными адресными устройствами. Поэтому если в случае с вновь вводимыми в эксплуатацию конвейерами данный метод адресации используется, то на существующем оборудовании необходимость модернизации кабельной инфраструктуры и замены датчиков является препятствием для его применения.

В настоящий момент существуют цифровые интерфейсы, например, 1-Wire³, способные передавать данные по двухпроводным линиям связи, используя эти же линии для питания собственных схем, – так называемое паразитное питание. Для корректной работы длина такой линии не должна превышать 100 метров, что в разы меньше необходимой в нашем случае длины. Кроме того, опрос всех датчиков и, соответственно, определение аварийной ситуации даже на коротких линиях потребует нескольких секунд, что неприемлемо с точки зрения обеспечения безопасности.

³ 1-Wire Manual // Rudra Dutta, Professor – NCSU. URL: https://dutta.csc.ncsu.edu/csc453_spring16/wrap/1-Wire-Design%20Guide%20v1.0.pdf (дата обращения 01.03.2020).

Таким образом, создание системы адресации датчиков, способной функционировать совместно с существующими датчиками безопасности ленточных конвейеров без необходимости модернизации кабельных сетей, является крайне актуальной задачей.

Метод шунтирования сигналом

Для определения адреса сработавшего дискретного датчика, включенного в двухпроводную линию, авторами был предложен метод «шунтирования сигналом» – решение, использующее адресные устройства, включенные параллельно сухим контактам датчиков. Эти устройства представляют собой сопротивление, модулируемое по величине генератором с уникальной для каждого датчика частотой (рис. 2). Для обеспечения питания этих устройств двухпроводная линия запитана постоянным током. Данное решение позволяет модернизировать существующие системы АСУ ТП без существенных изменений их структуры.

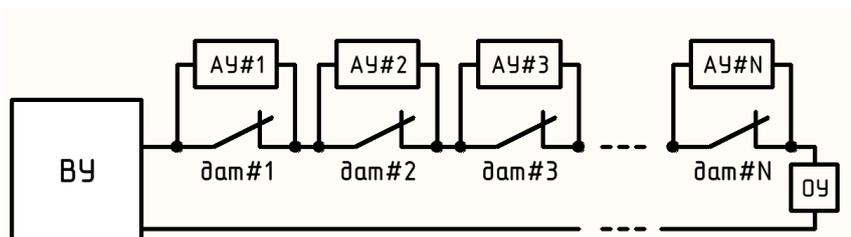


Рис. 2. Схема предложенной системы соединения датчиков
(АУ – адресное устройство, ОУ – оконечное устройство,
ВУ – вычислительное устройство)

Fig. 2. Proposed sensors connection diagram,
(AU – address device, OU – endpoint device,
VU – calculating device)

Система мониторинга с функцией адресации дискретных датчиков

Система состоит из вычислительного устройства, оконечного устройства и некоторого количества адресных устройств (по одному на каждый датчик безопасности).

Адресное устройство подключается параллельно сухим контактам дискретных датчиков. Соответственно, при размыкании любого из датчиков ток начинает течь через соответствующее подключенное адресное устройство (рис. 3).

Протекание постоянного тока через шунтирующий резистор и стабилитрон создает потенциал, который может быть измерен. Изменение потенциала (в течение нескольких миллисекунд) фиксируется при помощи аналогово-цифрового преобразователя (входы «АЦП1 МК», «АЦП2 МК»). Зная потенциал на шунтирующем резисторе, можно рассчитать силу тока в линии. При уровне тока ниже 25 мА устройство переходит в «нормальный» режим работы (излучение частоты), при уровне тока выше этого порога – в режим программирования (запись во внутреннюю память адресного устройства нового значения излучаемой частоты). Адресное устройство создано на основе микроконтроллера «Cortex-L0», алгоритм его работы представлен на рис. 4.

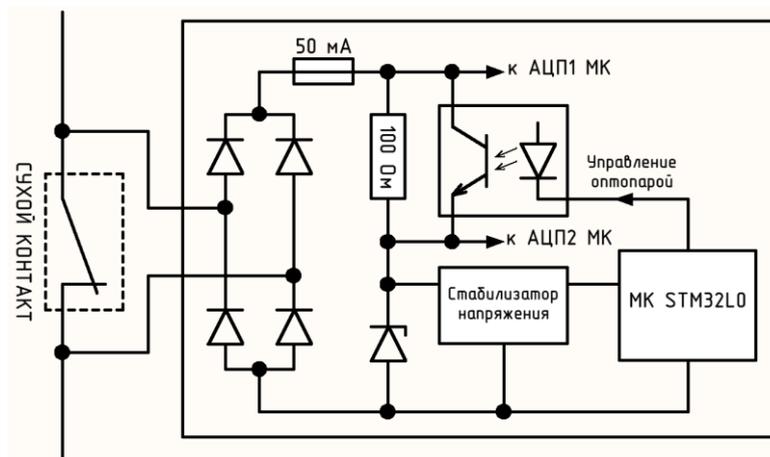


Рис. 3. Структура адресного устройства
Fig. 3. Structure of an address device

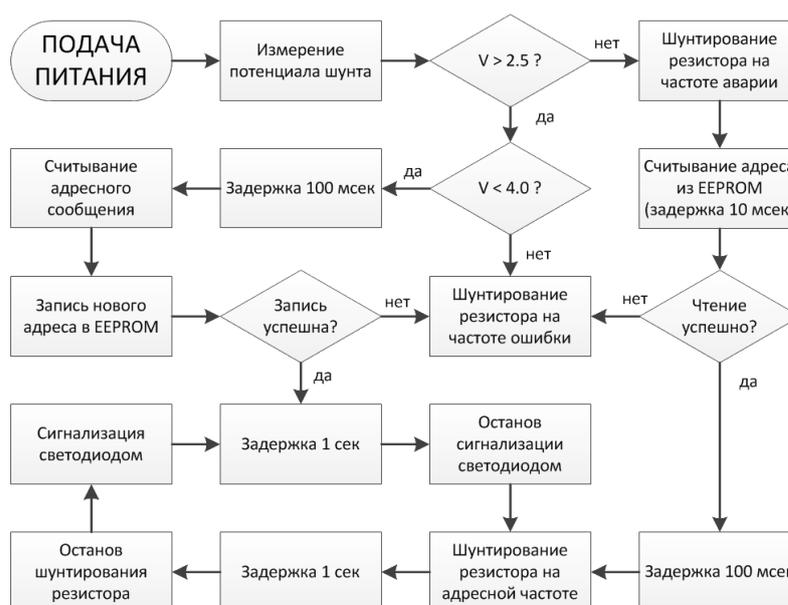


Рис. 4. Алгоритм работы адресного устройства
Fig. 4. Algorithm of an address device

С точки зрения аппаратной архитектуры *оконечное устройство* полностью повторяет адресное, отличается лишь алгоритм его работы: если адресное устройство рассчитано на работу лишь в случае аварии, то оконечное устройство подразумевает постоянное включение.

Главная задача *вычислительного устройства* – фиксирование момента аварийной ситуации. Для этого устройство производит постоянное измерение напряжения линии и проверку наличия в линии сигнала оконечного устройства. Любой скачок напряжения фиксируется как аварийная ситуация, как и исчезновение сигнала оконечного устройства. В этом случае вы-

числительное устройство передает код неизвестной аварийной ситуации «блоку контроля и управления» (БКУ)⁴, который, получив данный сигнал, производит экстренный останов конвейера.

После определения факта наступления аварийной ситуации вычислительное устройство должно определить причину аварии: либо это обрыв линии, либо короткое замыкание, либо срабатывание датчика.

При размыкании нормально замкнутого сухого контакта датчика срабатывает адресное устройство, которое начинает излучать сигнал в линию. Если установленная причина – срабатывание датчика (т. е. изменение потенциала линии в связи с включением адресного устройства), то необходимо установить его адрес. Для установления номера сработавшего датчика следует определить частоту, на которой адресное устройство излучает сигнал. Для уверенного определения частоты используются следующие методы: предобработка сигнала, дискретное преобразование Фурье, после чего вычислительное устройство производит поиск частоты сработавшего датчика в спектре. Номер обнаруженного датчика посылается в БКУ по протоколу CAN⁵. По номеру сработавшего датчика обслуживающий персонал может оперативно локализовать место аварии и приступить к ее устранению. Алгоритм работы вычислительного устройства приведен на рис. 5.

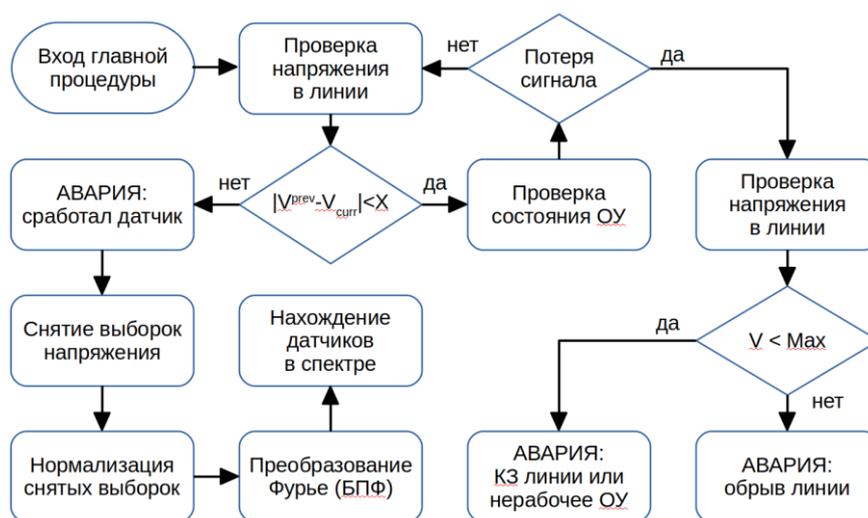


Рис. 5. Алгоритм работы вычислительного устройства
Fig. 5. Algorithm of a calculation device

Имитационный стенд

Для проведения испытаний устройств системы в условиях, максимально приближенных к реальным, необходимо создание физической модели объекта управления. В данном случае моделируется работа дискретных датчиков, адресных, оконечного и вычислительного устройств, а также ситуации обрыва и замыкания линии. В качестве модели сухих контактов датчика КТВ использовались нормально замкнутые двухпозиционные переключатели. Мо-

⁴ Блок контроля и управления для работы в условиях опасного производства: пат. 133951 Рос. Федерация. № 2013126010/08; заявл. 2013.06.05; опубл. 2013.10.27, Бюл. № 30.

⁵ Свидетельство 2015614905. Программа для потоковой обработки пакетов в протоколе MODBUS RTU: программа для ЭВМ / Д. И. Смолин (RU); правообладатель ИВТ СО РАН. № 2015614905; заявл. 26.12.14; опубл. 20.06.2015. 10 кБ.

делирование длинной линии было осуществлено при помощи бухты специального шахтного кабеля длиной около 1 км, для имитации разнесения в пространстве датчиков КТВ дополнительно использовались отрезки кабеля длиной 100 метров между каждым из смоделированных «датчиков». На основе физического имитатора сигналов датчиков и разработанного аппаратно-программного комплекса системы адресации был собран имитационный стенд (рис. 6).

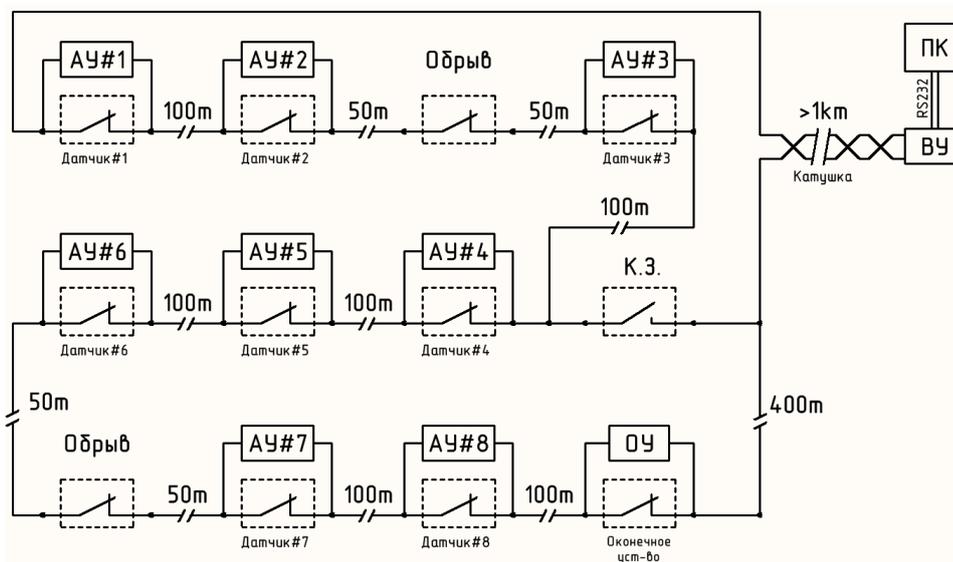


Рис. 6. Схема испытательного стенда

Fig. 6. Testbench schema

Состав стенда: 8 адресных устройств, оконечное устройство, катушка шахтного кабеля длиной 1 километр, вычислительное устройство (производящее поиск и выделение сигнала оконечного и адресных устройств в линии), и подключенный к нему персональный компьютер, используемый для визуализации результатов экспериментов. Также в состав стенда входит пульт с 12 переключателями, из которых: 8 нормально замкнутых переключателей (для включения каждого из 8 адресных устройств), 1 переключатель с оконечным устройством для моделирования выхода его из строя, 2 нормально замкнутых переключателя, имитирующих разрыв линии, 1 нормально разомкнутый переключатель для имитации короткого замыкания.

Обработка сигналов адресных устройств

Для частоты, на которой сработал датчик, применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Главным преимуществом БПФ является меньшая вычислительная сложность алгоритма, достигаемая разбиением задачи дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на крайне малые куски, что позволяет значительно ускорить вычисления [2]. В представленной ниже формуле отражена разница между вычислительной сложностью алгоритмов ДПФ и БПФ.

$$C_f = N \log(N), \quad C_d = N^2,$$

где C_f – вычислительная сложность БПФ, C_d – вычислительная сложность ДПФ, N – количество точек в исследуемом сигнале.

Единственным недостатком БПФ является то, что размерность входного массива точек должна равняться степеням двойки, но если нет возможности снять такое количество точек,

то достаточно заполнить входной массив точек нулями по краям до достижения требуемой размерности [2]. Преобразование Фурье позволяет оперировать с практически неограниченным диапазоном точек в спектре. Но это увеличивает временные затраты на преобразование и на регистрацию спектра, а также накладывает повышенные требования на размер памяти вычислительного устройства. В предложенной системе используется 1024 точки спектра, что хорошо сочетается с БПФ и не требует дополнения спектра пустыми точками по краям.

Вторая по важности характеристика ДПФ – частотное разрешение. Частотное разрешение задается не напрямую, а через изменение других параметров и определяется как отношение частоты дискретизации к количеству точек спектра. Его формула $R = F/N$, где R – частотное разрешение спектра, F – частота дискретизации (съемки) спектра, N – количество точек спектра, снимаемых с частотой дискретизации.

Для выделения сигнала в снимаемом спектре в вычислительном устройстве применяются методы по улучшению отношения сигнал / шум – предобработка сигнала при помощи активных частотных фильтров, построенных на операционных усилителях [3], и передискретизация (англ. oversampling) [2], при которой качество сигнала растет пропорционально правилу $P \sim \sqrt{N}$, где P – отношение мощности сигнала к шуму, а N – количество передискретизаций сигнала.

Для нахождения искомого сигнала в спектре применяется опорный сигнал, генерируемый оконечным устройством. Его мощность будет указывать пределы поиска сигналов адресных устройств. Например, если мощность исследуемого сигнала в 2 раза выше мощности опорного, то это свидетельствует о наложении друг на друга сигналов от двух разных адресных устройства с одинаковым адресом, а если мощность исследуемого сигнала заметно ниже мощности опорного, то такой сигнал считается помехой. Для усреднения значения опорной мощности была выбрана частота посередине исследуемого частотного диапазона. На практике расхождения между минимальной и максимальной мощностями исследуемых сигналов не превышают $\pm 15\%$, что укладывается в теорию экспоненциального снижения мощности сигнала от частоты. Экспериментально полученные данные зависимости амплитуды сигнала адресного устройства от частоты в длинной линии это подтверждают (рис. 7). Это связано с несовершенством модели длинной линии, в качестве которой использовалась катушка с двухжильным проводом диаметром 0.5 мм и длиной более 1000 м. Электрические параметры данной катушки: сопротивление 100 Ом, емкость 60 нФ и индуктивность 100 мГн. В связи с этим был выбран частотный диапазон с малым отклонением мощности сигнала (амплитуда лежит в пределах $1 \text{ В} \pm 15\%$). Использование более высоких частот, как видно из рис. 7, приводит к уменьшению амплитуды, а в области низких частот возрастает влияние помех от промышленного оборудования. Выбранной ширины диапазона в 2 кГц достаточно для размещения 30 адресных устройств с шагом в 50 Гц.

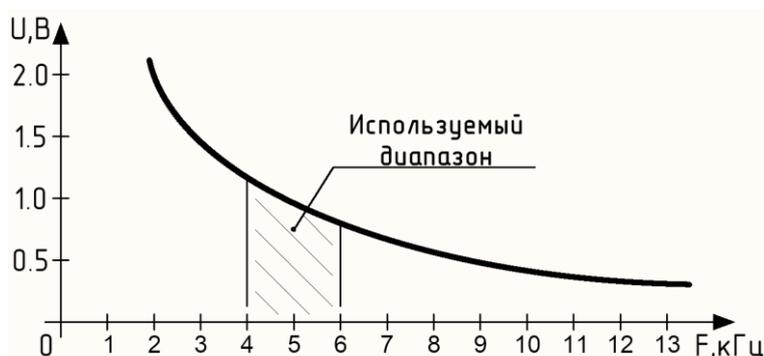


Рис. 7. Зависимость амплитуды сигнала от частоты

Fig. 7. Signal amplitude versus frequency

Результаты экспериментов

На практике невозможно реализовать генерацию микроконтроллером всего диапазона частот так, чтобы пики сигналов совпадали с частотным разрешением спектра сигнала. На рис. 8, *а* представлена ситуация, когда конвейер находится в рабочем состоянии и работает лишь оконечное устройство, при этом в спектре присутствует единственный пик, соответствующей частоте, генерируемой оконечным устройством (5 кГц). Рисунок 8, *б* демонстрирует ситуацию сработавшего датчика на частоте 4,6 кГц. Рисунки 8, *в* и *г* демонстрируют ситуации срабатывания двух и трех датчиков соответственно. Результирующие мощности сигналов колеблются в пределах $\pm 5\%$.

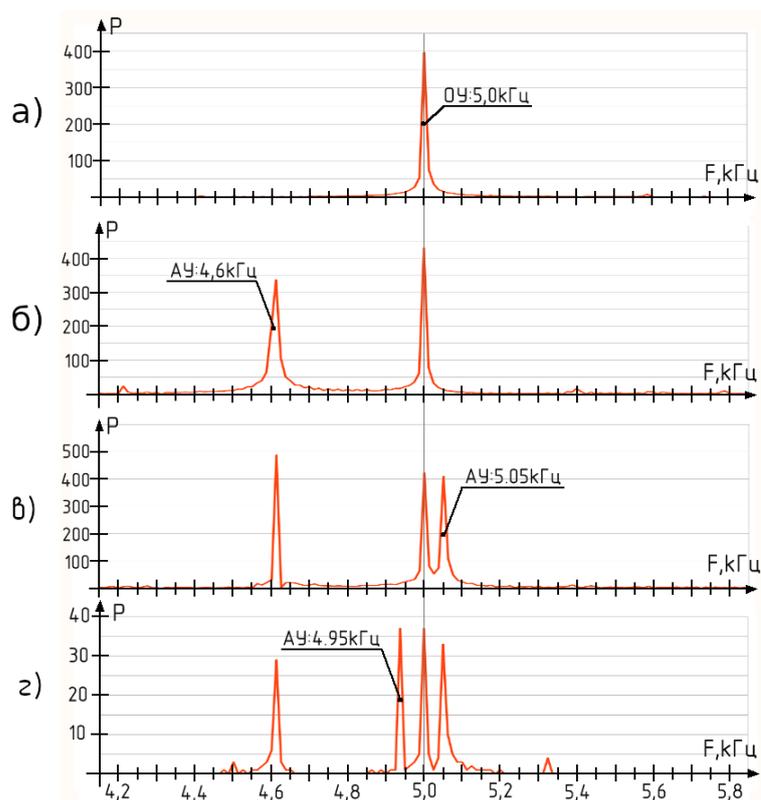


Рис. 8. Сигналы адресных и оконечного устройств
Fig. 8. Address and endpoint signals

Как видно из рис. 8, *в*, с частотным разрешением 12,5 Гц удалось добиться хорошего разрешения, позволяющего выделить 2 рядом стоящих частоты с шагом 50 Гц. Это позволяет нам выделять не менее 30 отдельных адресов в используемом диапазоне от 4 до 6 кГц.

Рисунок 8, *г* показывает возможность определения трех различных адресных и одного оконечного устройств в длинной линии, а также хорошего разрешения трех рядом стоящих частот с шагом 50 Гц. Из-за ограниченного напряжения на источнике тока в вычислительном устройстве постоянное напряжение в линии может подниматься лишь до определенных пределов. По достижении максимума напряжения сигнал от шунтирования резисторов в адресных устройствах становится значительно задавленным. Это проявляется в заметно меньшей определяемой мощности сигналов – пики достигают 400 (рис. 8, *а–в*), против пиков, не дохо-

дующих до 40 (рис. 8, з). Мощности, рассчитанные как площадь под графиком исследуемой частоты в области ± 25 Гц, также значительно отличаются: для случаев с одновременным включением вплоть до двух адресных устройств мощность составляет от 550 до 700 условных единиц; в случае работающего оконечного и трех одновременно сработавших адресных устройств мощности не превышают 50 условных единиц. Если необходимо четко определять три и более одновременно сработавших адресных устройств, то требуется использование большего питающего напряжения источника тока в вычислительном устройстве. Однако в случае применения данной системы в условиях угольных шахт, это напряжение ограничено требованиями по искробезопасности ⁶.

Заключение

По результатам работы был предложен и апробирован метод адресации дискретных датчиков, включенных в двухпроводную длинную линию. Создан экспериментальный образец системы мониторинга протяженных промышленных объектов, максимально приближенный к серийному и отвечающий требованиям, предъявляемым к системам, предназначенным для работы в условиях опасных по газу и пыли; разработаны алгоритмы работы системы. На основе экспериментального образца системы мониторинга и физической модели объекта управления создан имитационный стенд для физического моделирования, по результатам проведенных на нем экспериментов получены следующие данные о характеристиках системы мониторинга: определение аварийной ситуации за время, не превышающее 100 мс; определение адреса от одного до трех сработавших датчиков; определение типа аварийной ситуации, в том числе неработоспособность адресного и / или оконечного устройств.

Созданная в рамках данной работы система мониторинга может быть применена не только на конвейерном транспорте, но и на других протяженных промышленных объектах, в том числе на опасных по газу и пыли, где используются дискретные датчики контроля.

Список литературы

1. **Благодарный А. И., Гусев О. З., Журавлев С. С., Золотухин Е. П., Каратышева Л. С., Колодей В. В., Михальцов Э. Г., Шакиров Р. А., Шакиров С. Р.** Автоматизированная система контроля и управления ленточными конвейерами на угольных шахтах // *Горная промышленность*. 2008. № 5. С. 38–44.
2. **Steven W. Smith.** *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. California Technical Publishing, 1999. P. C. 170–213, 262–349.
3. **Картер Б., Манчини Р.** *Операционные усилители для всех* // *Додека XXI век*, 2016. С. 63–127.

References

1. **Blagodarny A. I., Gusev O. Z., Juravlev S. S., Zolotuhin E. P., Karatysheva L. S., Kolodey V. V., Mihaltsov E. G., Shakirov R. A., Shakirov S. R.** Automated control system for belt conveyors in coal mines. *Russian Mining Industry*, 2008, no. 5, p. 38–44. (in Russ.)
2. **Steven W. Smith.** *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. California Technical Publishing, 1999. P. C. 170–213, 262–349.
3. **Carter B., Manchini R.** *Op Amps for Everyone*. *Dodeka XXI century*, 2016, p. 63–127.

Материал поступил в редколлегию

*Received
11.10.2020*

⁶ ГОСТ Р 31610.11 – 2012 / IEC 60079-11:2006. Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь "i". М., 2012. 127 с.

Сведения об авторах

Колодей Виктор Васильевич, главный конструктор проекта конструкторско-технологического отдела Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)
vkolodey@gmail.com

Разумовский Павел Андреевич, инженер-программист конструкторско-технологического отдела Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)
p.razum@mail.ru

Шакиров Станислав Рудольфович, кандидат физико-математических наук, заведующий конструкторско-технологическим отделом Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)
ShakirovSR@ict.nsc.ru
ResearcherID U-4958-2018

Information about the Authors

Viktor V. Kolodey, project chief constructor of Design and Technology Department, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)
vkolodey@gmail.com

Pavel A. Razumovsky, software engineer of Design and Technology Department, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)
p.razum@mail.ru

Stanislav R. Shakirov, PhD, Head of Design and Technology Department, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)
ShakirovSR@ict.nsc.ru
ResearcherID U-4958-2018