

УДК 621.398, 621.391.1, 621.316.13

*Ю. Д. Карякин, Л. В. Гапотченко*

## Использование сложных широкополосных шумоподобных сигналов для передачи данных по электросетям в интеллектуальных системах контроля и управления

Рассматриваются возможности использования электросети низкого напряжения как канала связи для построения сетей передачи коротких сообщений и решения проблемы «последней мили». Предлагается реализация многоуровневой системы интеллектуального мониторинга, в основе которой используется разработанная технология передачи данных по электросети нового поколения nG-PLC. Рассмотрены перспективы внедрения и эффективного решения текущей задачи коммерческого учёта.

Ключевые слова: «последняя миля», «последний дюйм», шумоподобные сигналы, PLC, связь, комплексный учёт, мониторинг

### Об авторах

**Карякин Юрий Дмитриевич** – кандидат технических наук, чл.-корр. Белорусской инженерно-технологической академии, научный руководитель проекта ООО «Интеллектуальные технологии мониторинга».

**Гапотченко Леонид Викторович** – руководитель проекта ООО «Интеллектуальные технологии мониторинга». E-mail: itm-skolkovo@mail.ru. Москва, ул. Нарвская, 1А, к. 3, помещение 1.

Эффективное решение проблемы «последней мили» занимает сегодня высокий приоритет в умах учёных и специалистов, занимающихся вопросами связи. Основная цель – выбор оптимальных каналов связи, максимальной реализации их пропускной спо-

собности, построение дешёвой архитектуры для мониторинга, учёта, контроля и управления постоянно увеличивающегося количества различных датчиков, счётчиков, сенсоров, устройств и оборудования (рис. 1).

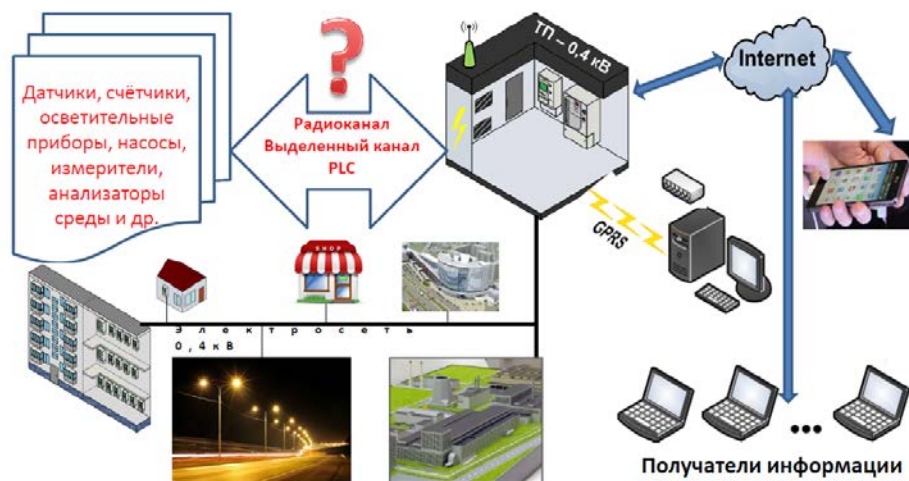


Рис. 1. Варианты выбора оптимального канала связи на «последней миле»

Определённое развитие сегодня получило технологическое решение NB-IoT (Narrow Band Internet of Things, 3GPP) для контроля устройств, генерирующих небольшие объёмы информации. Но как показывает практика его

внедрения [5], оно остаётся дорогим, обладает недостаточной помехоустойчивостью и сравнительно низкой информационной эффективностью. Появляются и другие решения, но все они, помимо низкой помехоустойчивости, оказываются дорогими в реализации и сопровождении. Между тем рынок требует надёж-

ное решение – «выстрелил-забыл», дешёвое и удобное для всех уровней передачи и управления, которое может быть обеспечено только при наличии эффективной технологии связи на «последней миле».

Большинство потребителей на «последней миле» объединяет сеть электропитания. Объединяющей технологией связи также может и должна стать технология передачи данных по электросети (PLC). Это было отмечено в рекомендациях Минэнерго РФ для использования в многоквартирных домах ещё в 2011

году [7]. Эксперты понимали, что линии электросети – это надёжные проводные практически бесплатные каналы связи, но отсутствие доступных решений связи не позволило на тот момент обеспечить массовую практическую реализацию рекомендаций. Концепция **SmartNetPLC**, предлагающая на основе новых технологических достижений использовать электросеть для передачи коротких сообщений на «последней миле», позволяет пересмотреть имеющуюся проблему и вывести её решение на новый качественный уровень (рис. 2).

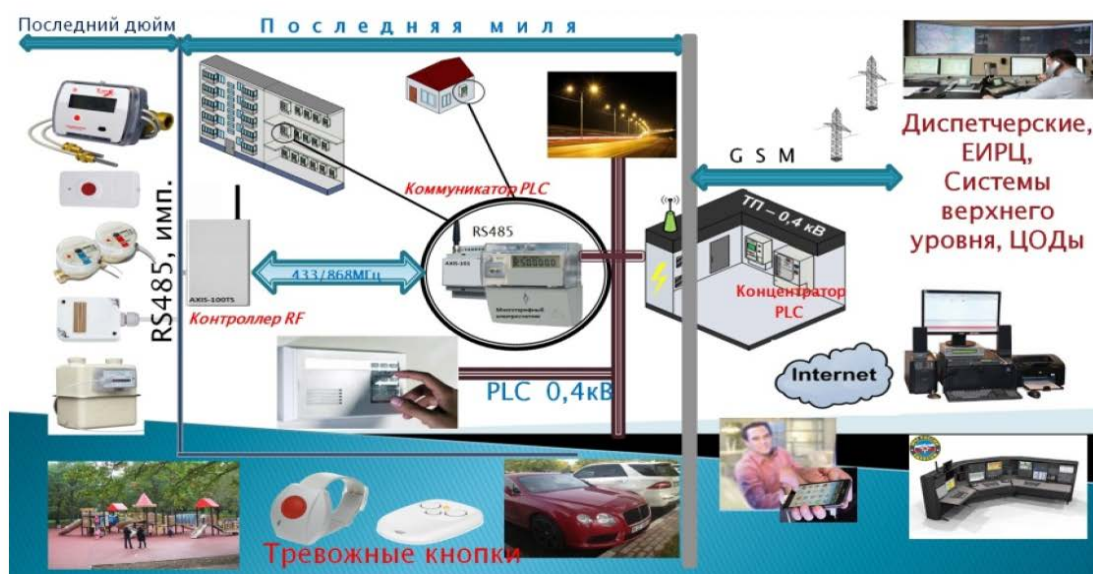
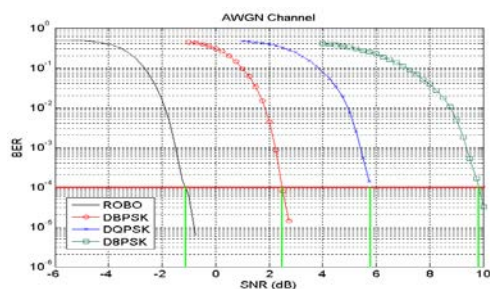


Рис. 2. Концепция SmartNetPLC – многоуровневая система передачи коротких сообщений

### 1. Электросеть как канал связи

Электросеть – сложный канал для организации связи, подверженный различного рода помехам. Известны многочисленные попытки решения данной задачи крупными ассоциациями (*G3*, *PRIME*) производителей

*NB-PLC*-оборудования (рис. 3), но достигаемый при этом уровень помехоустойчивости всё равно нельзя назвать достаточным для работы в «плохих» электросетях РФ и многих других стран.



Frequency Band	Typ Robo Data Rate (bps)	Typ DBPSK Data Rate (bps)	Typ DQPSK Data Rate (bps)	Typ D8PSK Data Rate (bps)	Max D8PSK Data Rate (bps)
CENELECA (36kHz to 91kHz)	4,500	14,640	29,285	43,928	46,044
FCC (150kHz to 487.5kHz)	21,000	62,287	124,575	186,863	234,321
FCC (10kHz to 487.5kHz)	38,000	75,152	150,304	225,457	298,224

Рис. 3. Помехоустойчивость технологии G3 для различных способов модуляции сигнала

Необходим качественный прорыв в преодолении указанного технологического барьера по помехоустойчивости канала связи. Он становится возможным с реализацией потенциального приёмника «по Котельникову».

Рассмотрим путь такого решения. Пропускная способность канала связи определяется формулой Шеннона:

$$C = \Delta F \cdot \log(1+h_0),$$

где  $\Delta F$  – полоса частот канала;  $h_0$  – отношение сигнал/шум.

Из этой формулы следует:

1. Пропускная способность при фиксированной полосе частот канала связи неограниченно возрастает при увеличении отношения энергии сигнала к мощности помех.

2. Энергия сигнала пропорциональна его длительности, т.е., увеличивая длительность сигнала ограниченной мощности, можно обеспечить надежную передачу информации при сколь угодно большом уровне помех.

Произведение полосы частот сигнала на его длительность называется базой сигнала. Из п. 2 следует, что чем больше база сигнала,

тем при большем уровне помех будет обеспечена передача информации.

На рис. 4 представлена схема потенциального приёмника Котельникова. Этот приёмник обеспечивает максимально возможную помехоустойчивость приема известного сигнала в канале с гауссовым шумом. Отметим, что при фиксированном значении мощности сигнала и шума помехоустойчивость приёмника не зависит от полосы частот сигнала, а определяется лишь его базой и числом используемых сигналов.

Для случая дискретных  $M$ -сигналов потенциальный приёмник изображен на рис. 5. Он обеспечивает скорость передачи, равную пропускной способности канала при бесконечном количестве сигналов бесконечной длины. Очевидно, что на практике такой приёмник нереализуем. Однако при достаточно большом конечном числе сигналов скорость передачи приближается к теоретическому пределу, и приёмник можно реализовать.

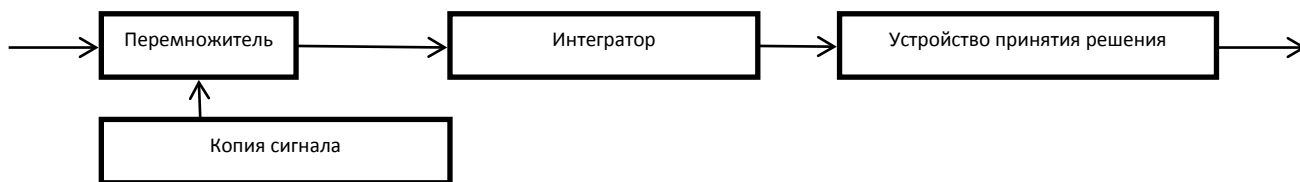


Рис. 4. Потенциальный приёмник Котельникова

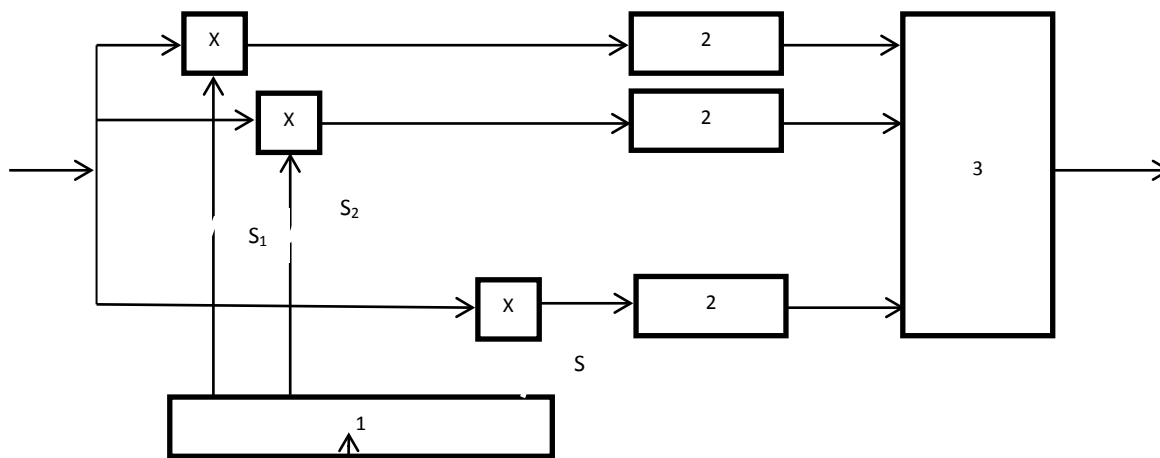


Рис. 5. Потенциальный приёмник Котельникова для  $M$ -сигналов:  
 1 – генератор  $M$ -образцов сигналов; 2 – интегратор (сумматор  $N$  отсчетов); 3 – устройство принятия решения

Обязательным условием достижения потенциальной помехоустойчивости является равномерное распределение вероятности передаваемых сигналов, максимальное разнесение сигналов в многомерном пространстве признаков, т.е. выбор такого множества сигналов, для которых попарные расстояния максимальны. По мере роста размерности пространства признаков (базы сигнала) расстояние между сигналами также возрастает, поэтому эффективность системы связи возрастает с ростом  $M$  и  $N$ .

Еще одним обязательным условием нормальной работы приемника является знание всех параметров искаженных в канале связи принимаемых сигналов и статистики помех. На практике приемнику известна только эталонная форма всех используемых для передачи сигналов. Большинство же остальных параметров приемнику неизвестны или известны статистически с некоторой погрешностью. Во всех случаях неизвестна амплитуда, фаза и относительная задержка принимаемого сигнала. В большинстве случаев частота

сигнала также задается с большой погрешностью (чем выше требования к стабильности частоты, тем дороже оборудование). Поэтому потенциальный приемник дополняется измерительным трактом, который должен на первом этапе измерить неизвестные параметры сигналов и помех, а на втором этапе использовать эту информацию для оптимального приема и распознавания передаваемых сигналов, например, управляя характеристиками корректирующего фильтра на входе приемника.

Линии связи характеризуются изменчивостью своих характеристик во времени, помехи также меняют свою интенсивность и спектр. Измерительная информация быстро устаревает, требуется ее постоянное обновление. В результате, оптимальный приемник должен быть адаптивным, т.е. осуществляющим непрерывный мониторинг характеристик линии связи и адаптивную коррекцию принимаемых сигналов на входе оптимального приемника. На рис. 6 приведена его обобщенная схема.

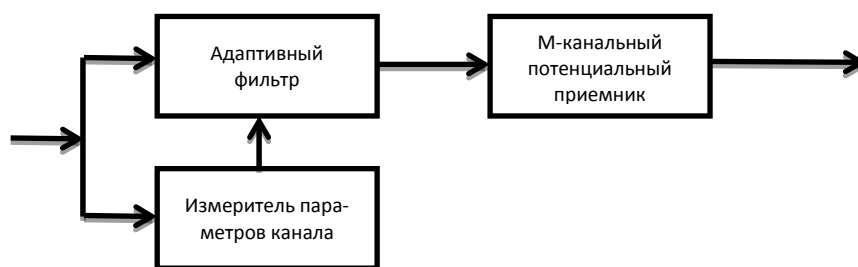


Рис. 6. Схема адаптивного оптимального приемника

При любом способе практической реализации потенциального приемника: либо в виде множества параллельных устройств, либо в виде одного процессора, выполняющего все вычисления последовательно, сложность и стоимость реализации нелинейно зависят от требуемого количества операций. В первом приближении общее число математических операций при реализации приемника «в лоб» пропорционально произведению  $M \cdot N$ . Учитывая, что приемник должен работать в масштабе реального времени и успевать обрабатывать предыдущий сигнал до поступления следующего, технические ограничения на цифровой процессор существенно уменьшают

достижимые значения  $M$  и  $N$ , снижают помехоустойчивость и увеличивают стоимость приемника.

Применение специальных быстрых алгоритмов цифровой обработки сигналов, например быстрого преобразования Фурье (БПФ), позволяет существенно снизить требования к процессору. Однако в сложных каналах связи (гидроакустических, сейсмических, PLC и т.д.) для обеспечения требуемой помехоустойчивости уменьшения сложности вычислений за счет БПФ недостаточно.

Новые алгоритмы быстрых преобразований Карякина (БПК) [1; 2; 4] позволили на несколько порядков уменьшить количество

математических операций, требуемых для реализации потенциального приемника, что дало возможность не только резко увеличить его помехоустойчивость, но и существенно снизить стоимость. Сверхбыстрые преобразования основаны на использовании структурных свойств сигналов и позволяют в процессе цифровой обработки исключить повторные вычисления.

В качестве примеров успешного внедрения алгоритма БПК можно назвать реализацию следующих систем:

1. Гидроакустический комплекс «Структура» сверхдальней гидроакустической связи между подводными лодками. Комплекс был принят на вооружение ВМФ СССР в 1991 г.

2. Система охранно-пожарной сигнализации «*AXIS-1000*», использующая для передачи информации провода электросети. Была установлена в головном здании банка «Беларусь» в г. Минске в 1996 году.

3. Система АСКУЭ Хенаньской электротехнической компании (КНР), ставшая первым прототипом нового решения.

В разработанной технологии *PLC* нового поколения – *nG-PLC* – наряду с БПК, применены собственные и наилучшие существующие научно-технические достижения:

1. Сложные широкополосные кодовые сигналы (ансамбль из 1024 биортогональных сигналов) с большой базой (от 400 до 24 000), что совместно с нелинейной обработкой позволило обеспечить эффективную защиту от импульсных, узкополосных и других помех. Рабочая полоса частот: 20–148,5 кГц, без несущей, скорость в канале – до 3 кбит/с.

2. Адаптивная интеллектуальная согласованная фильтрация, позволяющая обеспечить высокоэффективную защиту от многолучевости.

3. Асинхронно-адресное разделение каналов, обеспечивающее эффективную защиту от коллизий и возможность значительного уменьшения трафика в сети.

4. Сверхбыстрые преобразования цифровой корреляционной обработки сложных сигналов, позволяющие обеспечить аппаратную реализацию на дешёвой элементной базе.

Способ и устройство передачи информации по электросети защищены патентом РФ № 2491719 [3].

## 2. Система интеллектуального мониторинга на основе технологии *nG-PLC*

На базе новой технологии и концепции **SmartNetPLC** предлагается создание распределённой системы коммерческого учёта энергоресурсов, подразумевающей мониторинг точек контроля во времени, приближенном к реальному [6].

Основными элементами системы интеллектуального мониторинга по электросети становятся (рис. 7) следующие.

– **Концентратор *PLC*** – устройство сбора данных по трем фазам электросети и передачи на верхний уровень системы или в облачный сервис. Он формирует самоорганизующуюся сеть, обеспечивает ведение таблиц состояния и контроль изменения (приращения) показаний всех устройств на всех уровнях сети, а также предварительную обработку поступающих данных для снижения трафика дальнейшей передачи по восходящему каналу связи.

– **Коммуникатор *PLC*** – устройство, обеспечивающее сбор и передачу данных от оконечных устройств (счётчики, датчики, сенсоры и т.п.), ретрансляцию данных от других коммуникаторов, приём команд управления от **Концентратора *PLC***. Оснащается необходимым количеством дешёвых входных интерфейсов (импульсный, *RS-485* и т.п.) или встраивается в оконечное устройство с использованием интерфейса *UART*. Для получения данных от устройств, имеющих автономное питание (счётчики, датчики и тому подобное внутри квартир и офисов, размещённых на удалении от линии электропитания), оснащается помехоустойчивым радиоканалом, построенным на принципах обработки сигналов, аналогичных используемым в *nG-PLC*.

Визуализация получаемой в системе информации может обеспечиваться с помощью стандартных средств отображения (смартфон, компьютер и т.п.) после её интеллектуальной обработки в облачном сервисе или специализированной диспетчерской программе. Пользователь будет иметь самые последние показания, а также необходимые прогнозы и рекомендации по сокращению расхода ресурсов.

Основное отличие новой системы передачи информации от применяемых систем – восходящий канал связи, работающий по событию со случайным адресным доступом

к каналу связи. Такие возможности сегодня недоступны ни одной из существующих систем, за исключением очень дорогих систем с выделенным каналом связи. Электросеть

может успешно стать основной платформой для передачи информации, т.е. «интеллектуальной сетью» на «последней миле».

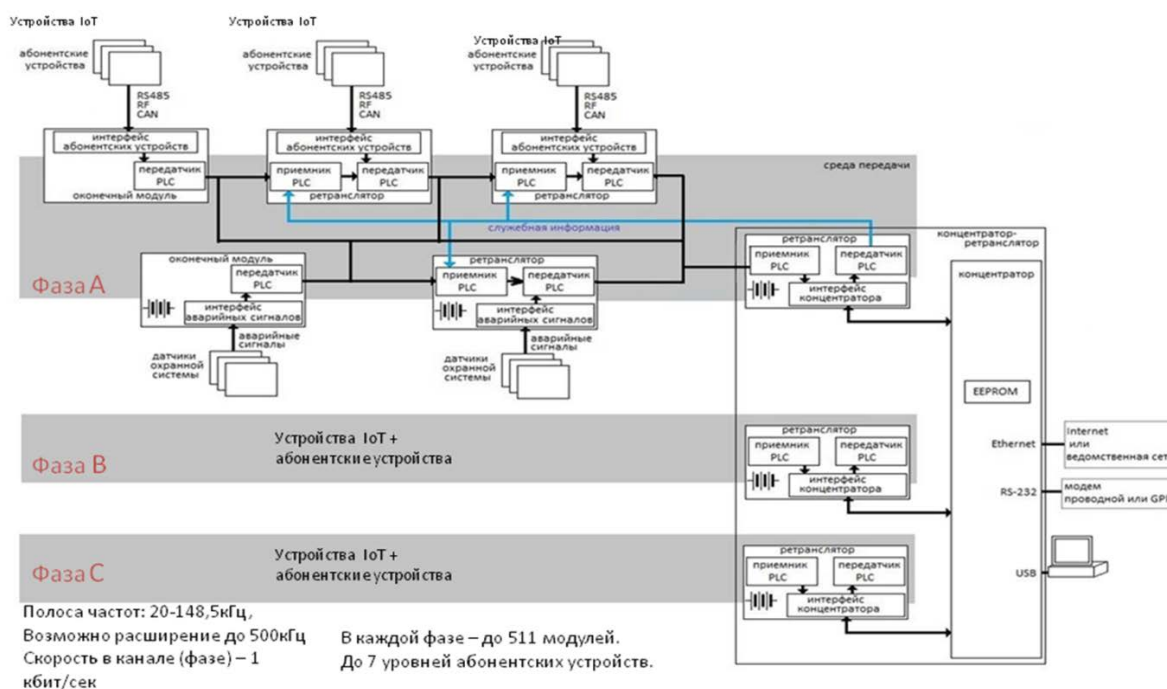


Рис. 7. Схема передачи информации по электросети на основе технологии nG-PLC

Система сможет обеспечить работу во времени, приближенном к реальному, не только по сбору данных учёта потребления энергоресурсов (вода, газ, тепло, электричество), но и позволит контролировать датчики и счётчики для общедомовых нужд, отдельные системы (парковка, температура в помещениях, насосы, кондиционирование), управлять освещением внутри дома и во дворе, а в перспективе обслуживать устройства «интернета-вещей».

Основными критериями, которыми руководствовались разработчики при создании данной интеллектуальной системы, были:

- доступность массовой и простой реализации, в том числе обеспечение возможности кратного снижения стоимости точки контроля и системы в целом;
- достижение минимальной стоимости 1 бита доставленной полезной информации.

Обе поставленные задачи являются взаимосвязанными, и они были успешно решены. В интеллектуальной системе, в отличие от набора «интеллектуальных» устройств, дол-

жен быть обеспечен перенос максимального количества функций от оконечных устройств на самый верх или узлы системы. Например, для электросчётчиков это их показания, многотарифность, точное время, расписания, ряд вычисляемых сегодня на борту счётчика параметров. Это позволит упростить или даже исключить избыточные конструктивные элементы, такие как дисплей, сложный вычислитель, дорогой корпус. Разработанный нами прототип распределённого электросчётчика нового поколения оказался в 3–5 раз дешевле применяемых сегодня аналогичных «интеллектуальных» электросчётчиков, превращая их в измеритель только тех параметров, которые необходимы потребителю для расчётов с поставщиком ресурса. Прозрачный контроль показаний потребления ресурса может осуществляться потребителем, гарантирующим поставщиком и управляющей компанией в своих личных кабинетах в облаке в объёме необходимых компетенций. Но и тогда остаются значительные перспективы для снижения стоимости точки контроля (ещё в 2–3 ра-



за!) путём установки приборов группового учёта, например, для всех потребителей этажа или лестничной клетки. Предлагаемые меры, помимо достижения экономии ресурсов, позволяюткратно увеличить производство подобных измерителей нового поколения и обеспечить форсированное внедрение комплексных систем учёта взамен морально и физически устаревших АСКУЭР различного назначения, учитывая тот факт, что расходы населения, например, на оплату тепла в разы больше расходов на воду и электричество. Предлагаемый путь видится очень эффективным направлением для решения задач, поставленных перед энергоснабжающими организациями в ФЗ № 522 от 27.12.2018 г. и ПП № 890 от 19.06.2020 г.

Достижение минимальной стоимости 1 бита доставленной полезной информации обеспечивается путём абсолютного уменьшения общего трафика с переходом на передачу данных *по событию* и увеличения в нём доли полезной информации за счёт эффективного кодирования и использования шумоподобных сигналов. Достигается существенная экономия трафика (до 100 раз) по сравнению с «прозрачными» протоколами, которые вынуждены сегодня применять в комплексных системах по причине использования оборудования различных производителей.

### 3. Перспективы внедрения

Внедрение новой системы может существенно повлиять на скорость технического перевооружения в области коммерческого учёта, внедрения «умных электросетей», производства киберфизических систем и устройств. Простота и стоимость реализации каналобразующего оборудования не только экономит многочисленные ресурсы, но и снизит нагрузку на экологию. Традиционное перевооружение только электроучёта, а это около 50 млн электросчётчиков, в РФ может составить до 1,5 трлн рублей. Новая технология может сократить эти затраты минимум втрое. А возможности появления новых сервисов и направлений для частной реализации сегодня трудно оценить.

Между тем, изменение порядка коммерческого учёта и его технической составляю-

щей в виде появления индивидуальных и групповых измерителей может встретить сопротивление сегодняшних лидеров рынка, лоббирующих собственные проекты. Мы рассчитываем на компетентность и объективность руководителей отраслей ЖКХ и Минэнерго, принимающих ответственные решения в пользу цифрового развития, прозрачности, удобства потребителей.

### Библиографический список

1. Дворников В.Д., Лосев В.В., Карякин Ю.Д., Будько А.А. Устройство определения фазы М-последовательности. Авторское свидетельство SU 625314 A1, 25.09.1978. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40004145> (режим доступа: по логину и паролю. Дата обращения: 18.12.20).
2. Карякин Ю.Д. Быстрое корреляционное декодирование кодов Рида–Маллера // Проблемы передачи информации. 1987. т. 23. Вып. 2. С. 40–49. – URL: <http://www.mathnet.ru/links/5611ebd71a1062b6d7bc65711cf8ea08/ppi801.pdf> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 18.12.20).
3. Карякин Ю.Д. Способ и устройство передачи информации по электросетям // Патент РФ № 2491719. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37515608> (режим доступа: по логину и паролю. Дата обращения: 18.12.20).
4. Карякин Ю.Д., Лосев В.В. Устройство для синхронизации м-последовательности // Изобретение № 544156. – URL: <https://patents.su/3-544156-ustrojstvo-dlya-sinkhronizacii-m-posledovatelnosti.html> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 18.12.20).
5. Новиков С. Билайн активировал технологию NB-IoT по всей Москве // Mobile-review. 02.07.2020. – URL: <https://mobile-review.com/news/bilajn-aktiviroval-texnologiyu-nb-iot-po-vsej-moskve> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 08.12.20).
6. Петров В.А., Карякин Ю.Д., Гапотченко Л.В. «Умное» ЖКХ. Дождёмся ли? // Коммунальщик XXI века. 2019. № 7. С. 38–45.
7. Приказ Минэнерго РФ от 22.03.2011 г. № 86 «Об утверждении методических рекомендаций по техническим характеристикам систем и приборов учёта электрической энергии на основе технологий интеллектуального учёта».

Поступила в редакцию

22.10.2020

УДК 53.07

**О. В. Стрекаловский, Е. И. Николенко****Регистрация альфа-частиц с помощью многопиксельных кремниевых детекторов *Timerix3***

Рассматриваются некоторые особенности работы пиксельного детектора *Timerix3*. Количество каналов в 65 536 пикселей с координатным разрешением 55 мкм, временное разрешение 1,5625 нс, удобство использования заслуженно привлекают внимание экспериментаторов. Разработанное программное обеспечение позволило провести первые эксперименты с регистрацией альфа-частиц, показавших обнадеживающие результаты.

**Ключевые слова:** пиксельный полупроводниковый детектор, система регистрации, *Timerix3*, регистрация альфа-частиц

**Об авторах**

**Стрекаловский Олег Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна». *E-mail:* stroleg1@yandex.ru. 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19.

**Николенко Евгений Игоревич** – студент 4-го курса кафедры интеллектуального управления техническими системами государственного университета «Дубна».

Современные специализированные интегральные схемы предоставляют новые возможности в самых различных областях человеческой деятельности. Детекторы *Timerix3* были разработаны для регистрации излучения в рамках коллаборации *Medipix* [1]. *Timerix3* – это пиксельный гибридный детектор, разработанный для обнаружения и визуализации рентгеновского излучения и заряженных частиц. Данные детекторы имеют широкую область применения, начиная с физики, заканчивая разработками в области медицины. Яркими примерами является применение *Timerix* в экспериментах в ЦЕРН [2], в ионно-лучевой терапии [3]. В декабре 2014 года детекторы *Timerix* были установлены на ракете NASA “*Orion*” для измерения распределения дозы излучения на орбите [4].

**Особенности детектора**

*Timerix3* представляет (рис. 1) собой активный сенсорный слой (кремний толщиной 350–500 мкм), соединённый с сегментированной поверхностью специально разработанной заказной интегральной схемы ASIC (CMOS 0,13 мкм технология), обеспечивающей чтение информации. Получается матрица 256×256 пикселей (шаг пикселя 55 мкм). Частицы, взаимодействующие в активном материале детектора, создают носители зарядов,

которые дрейфуют к пикселизованному электроду, где они собираются. Для каждого пикселя одновременно фиксируется и время появления сигнала (с временным разрешением 1,5625 нс) и заряд, определяемый количеством созданных носителей, по которому измеряют энергию.

В каждом из 65536 каналов интегральной схемы имеется зарядо-чувствительный дифференциальный СМОП предусилитель на базе схемы Крумменахера [5]. Вместе с дискриминатором они формируют сигнал (рис. 2), пересечение порогового уровня которого определяет временной интервал, длительность которого пропорциональна попавшему в пиксел заряду. Определение длительности связано с простым подсчетом числа импульсов генератора, как в преобразователе Вилкинсона. Для определения момента попадания частицы в детектор применяется два генератора, частотой 40 МГц и 640 МГц. Первый запускается в момент запуска набора данных, и глубина регистров для хранения результата позволяют непрерывную работу до 20 дней (с системой регистрации «Катерина» [6]). Генератор 640 МГц запускается в момент пересечения сигналом порога и подсчитывается длительность интервала до первого нарастающего фронта основного генератора. Обеспечивается точность временной привязки на уровне 1,56 нс.



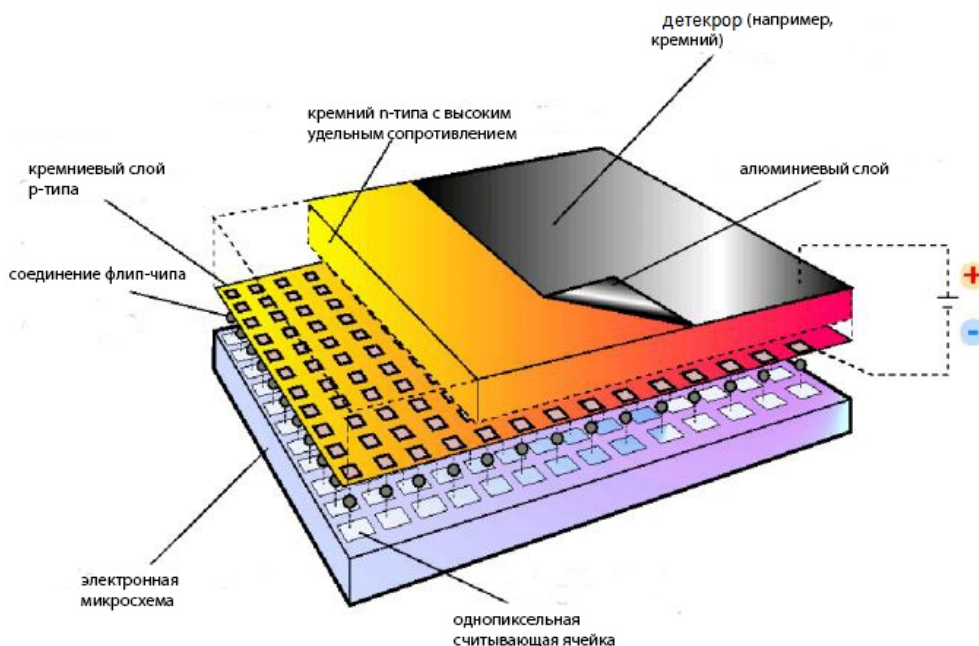


Рис. 1. Конструкция пиксельного детектора *Timepix3*

Eur. Phys. J. C (2017) 77:421

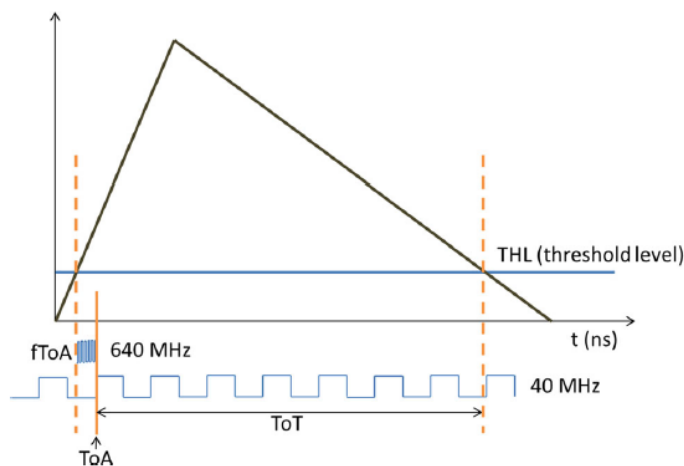


Рис. 2. Механизм преобразования в канале детектора

Стандартная калибровка необходима для каждого пикселя и делается по линиям характеристического рентгеновского излучения (рис. 3) [7; 8]. Эти данные хранятся в ка-

либровочных файлах. Используя эти файлы, можно получить энергию, пришедшую на пиксел по формуле:

$$E = \frac{a \cdot t + E_{\text{код}} - b + \sqrt{(b + a \cdot t - E_{\text{код}})^2 + 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a};$$

где  $a, b, c, t$  – данные калибровочных файлов;  $E_{\text{код}}$  – значение, пришедшее на пиксел.

Для сбора данных с детектора *Timepix3* используется управляющий модуль *Katherine*,

подключенный к компьютеру по сети *Ethernet*, и программа сбора *BurdaMan*. Формируется текстовый файл с информацией о номере сработавшего регистрирующего пикселя, значении счетчиков времени и счетчика энергии. Для предварительного анализа данных нами

разработано программное обеспечение в среде *LabView2020* (рис. 4).

Показано распределение энергии и времени для каждого пикселя в зарегистрированном кластере от альфа-частицы.

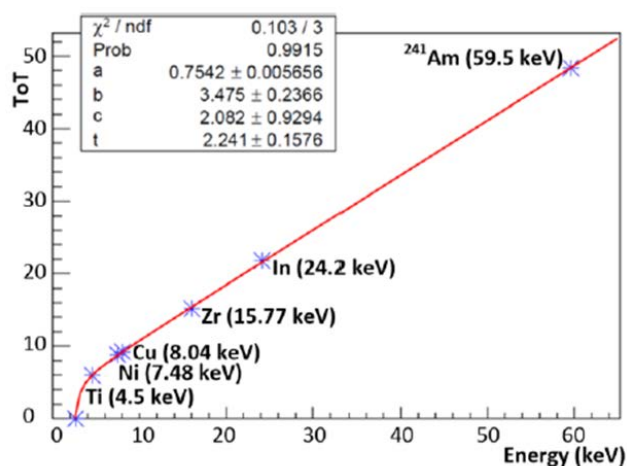


Рис. 3. Зависимость зарегистрированного кода от энергии, отмечены точки, по которым проводится калибровка

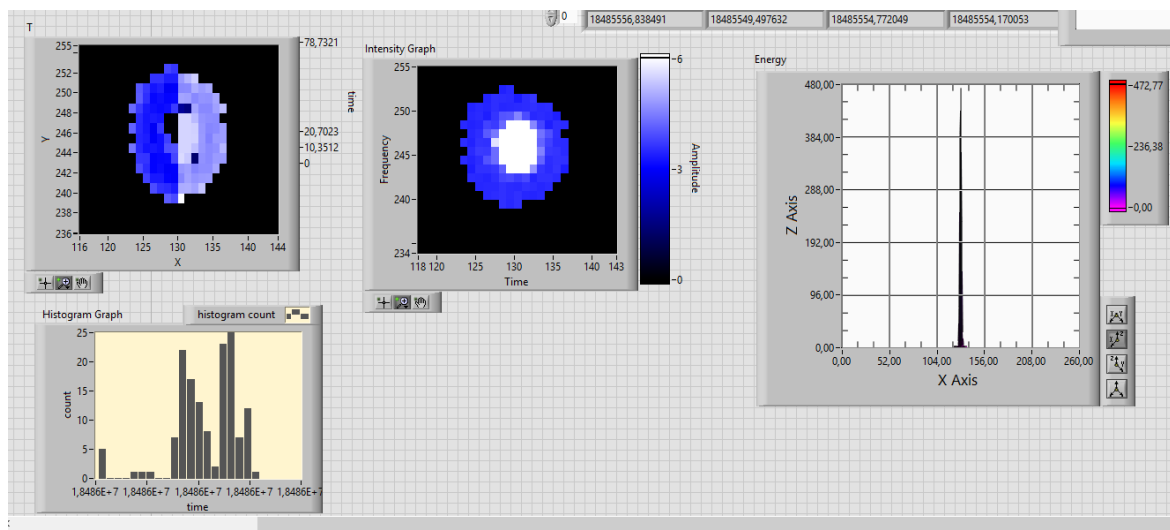


Рис. 4. Панель оператора программы предварительной обработки данных детектора *Timex3*

Задача данной работы понять, можно ли применить этот детектор для регистрации альфа-частиц с энергиями в несколько МэВ, когда многие пиксели образовавшегося кластера попадают в области насыщения.

### Экспериментальная часть

Проверкой правильности работы системы будет сравнение известного энергетического спектра, полученного от источника с помощью *Timex3* и от другого детектора,

в нашем случае кремниевого *PiN*-диода. Радиоактивный источник  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  с тремя явно выраженными линиями был установлен на расстоянии 1 см от поверхности *PiN*-детектора, подключенного к анализатору *CAEN*, и набранный спектр сравнивается со

спектром, зарегистрированным *Timerix3*. Обычный воздух для альфа-частиц является плотной средой, приводящим как к потере примерно 1 МэВ энергии, так и к размыванию спектра (рис. 5). Тем не менее, можно увидеть разделение линий 5155 и 5439 КэВ.

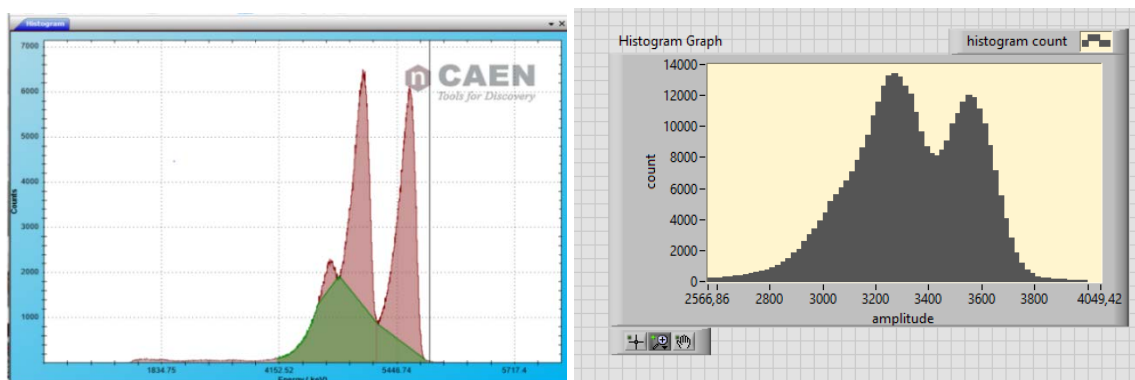


Рис. 5. Спектр альфа-частиц от радиоактивного источника  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , набранный с помощью *PiN*-диода (слева) и детектора *Timerix3* (справа)

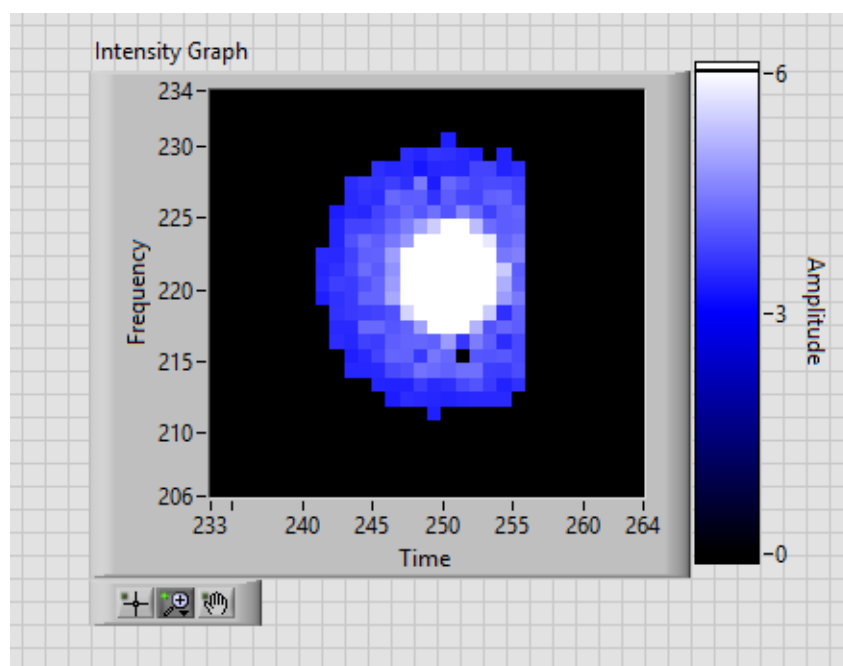


Рис. 6. Зарегистрированный кластер от альфа-частицы, попавший близко к краю детектора

Линия, связанная с  $^{233}\text{U}$ , оказалась «замазана» альфа-частицами с энергиями, которые меньше истинных значений. Одним из причин является наличие частиц, попавших ближе к краям рабочей области детектора. Так как вклад в энергию определяется суммой энергии всех пикселей в кластере, такие обрезанные кластеры (рис. 6) искажают часть спектра с меньшими энергиями.

### Выводы

Особенности детектора *Timerix3*, связанные с его исключительным пространственным разрешением (55 мкм), хорошим временным разрешением (1,56 нс), удобным способом регистрации, позволяют проводить разные эксперименты не только с рентгеновскими квантами, но и с альфа-частицами. Определение энергии альфа-частиц по размеру и

суммарной энергии регистрируемых кластеров требует дальнейшего исследования. Эксперименты, связанные с регистрацией альфа-частиц, предполагают работу в вакууме. Это требует специальной системы подключения детектора и охлаждения, которые разрабатываются в настоящее время.

### Библиографический список

1. Burian P., Broulím P., Bergman B.B., Georgiev V., Pospishil S., Pushman L., Zich J. Timepix3 detector network at ATLAS experiment // Journal of Instrumentation. 2018. JINST 13. C11024.
2. Burian P., Broulim P., Jars M., Georgiev V., Bergmann B.Katherine: ethernet embedded readout interface for Timepix3 // Journal of Instrumentation. 2017. JINST 12. C11001.
3. Jakubek J. Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 633. 2011. P. 262–266.
4. Kruppenacher F. Pixel detectors with local intelligence: an IC designer point of view // Nucl. Inst. And Meth. 1991. A305. P. 527.
5. MediPix3. – Электронные текстовые данные. Medipix collaboration. – URL: <https://medipix.web.cern.ch> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 16.10.2020).
6. Timepix Detector for Imaging in Ion Beam Radiotherapy. – Электронные текстовые данные. Medipix collaboration. – URL: <https://medipix.web.cern.ch/timepix-detector-imaging-ion-beam-radiotherapy> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 11.11.2020).
7. Timepix in NASA's Orion Rocket – Электронные текстовые данные. Medipix collaboration. – URL: <https://medipix.web.cern.ch/timepix-nasa-orion-rocket> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 15.11.2020).
8. Turecek D., Jakubek J., Kroupa M., Soukup P. Energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode using test pulses // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, USA. 2011. P. 1722.

---

*Поступила в редакцию  
22.10.2020*