

Применение беспроводных сенсорных сетей в пищевой промышленности

В.А. Романов, А.В. Вороненко, И.Б. Галелюка

Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
03187, г. Киев, проспект Академика Глушкова, 40, VRomanov@i.ua

V. Romanov, O. Voronenko, I. Galelyuka APPLICATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IN FOOD INDUSTRY

Abstract. Food and beverage production requires quality control on all stages of complicated technological process. Considering that beverages, namely alcoholic drinks, beer, drinking water, juices and others belong to mass products, so not only the large well-equipped manufactures, but a large number of small manufactures produce them. Very often, the last ones have no necessary control and measurement equipment that results in not guaranteed quality of final products. The work aim is to develop the distributed quality control system for various beverages on different stages of their manufacturing. This aim can be achieved by development and creation of multi-biosensors and sensor networks, based on which it is proposed to create the distributed quality control systems. Proposed control and measurement equipment is based on two technologies: technology of biological multisensors and technology is Internet of Things technology, based on wireless sensor networks. The combination of these technologies made it possible to create enough simple control and measurement equipment, which gives possibility to control the parameters of beverages on all stages of production. The distributed quality control system is wireless sensor network, which is based on ZigBee protocol and contains a large number of wireless measuring nodes and one network coordinator. Network coordinator integrates wireless nodes into network, supports the operation of whole network, in certain time intervals checks network state, adds new wireless nodes, manages and conducts the measurements, stores and primary processes the data. Wireless sensor nodes can operate as part of network, based on ZigBee protocol, and as well as autonomous sensors, using Bluetooth protocol beyond the network. In the last case, the user can manage the wireless measuring node and receive data from it, using the mobile phone or tablet. Measuring node contains several biosensors. Each biosensor is made on the base of electrochemical element, which contains, for example, platinum electrode placed in glass tube. A membrane, covered with certain enzyme, closes up the glass tube. The main purpose of enzyme is to pass the ions of ingredient, concentration of which should be measured by biosensor, to the electrode surface. Accordingly, one wireless measuring node, which contains several biosensors with different enzymes, can measure concentration of several various components in beverage on any stage of its production.

Key words: wireless sensor network, Internet of Things, Industrial Internet of Things.

Аннотация. Цель работы заключается в создании распределенной системы контроля качества различных напитков на разных стадиях их производства. Достичь эту цель можно путем разработки и изготовления мультибиосенсоров и сенсорных сетей, на основе которых предложено строить распределенные системы контроля. Распределенная система контроля представляет собой беспроводную сенсорную сеть, построенную на основе протокола ZigBee, содержащая в своем составе большое количество беспроводных измерительных узлов, а также координатор сети.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, интернет вещей, промышленный интернет вещей.

Анотація. Виробництво харчових продуктів і напоїв потребує контролю якості продукції на усіх етапах складного технологічного процесу. Враховуючи, що напої, зокрема, вино-горілчані вироби, коньяки, пиво, питна вода, соки та багато інших, відносять до масової продукції, то її виготовленням займаються не тільки великі добре обладнані виробництва, але і багато невеликих виробників. Часто останні не мають необхідного контрольно-вимірювального обладнання, що часто зумовлює не гарантовану якість кінцевої продукції. Мета роботи полягає у створенні розподіленої системи контролю якості різноманітних напоїв на різних стадіях їх виробництва. Досягнути цю мету можна через розроблення та виготовлення мультибіосенсорів і сенсорних мереж, на основі яких запропоновано будувати розподілені системи контролю. В основу запропонованого контрольно-вимірювального обладнання покладено дві технології: технологія біологічних мультисенсорів і технологія Інтернету речей на базі бездротових сенсорних мереж. Об'єднання цих двох технологій дало можливість створити досить просте контрольно-вимірювальне обладнання, яке здатне контролювати параметри напоїв на всіх етапах їх виробництва. Розподілена система контролю являє собою бездротову сенсорну мережу, яку побудовано на основі протоколу ZigBee і яка містить у своєму складі велику кількість бездротових вимірювальних вузлів, а також координатор мережі. Координатор мережі здійснює об'єднання бездротових вузлів у мережу, підтримує роботу цілої мережі, через певні інтервали часу перевіряє її стан, додає нові вузли у мережу, керує вимірюваннями, збирає та попередньо обробляє дані вимірювань. Бездротові вимірювальні вузли можуть функціонувати як в складі мережі на основі ZigBee протоколу, і так як автономні сенсори, застосовуючи протокол Bluetooth. В останньому

© В.А. РОМАНОВ, А.В. ВОРОНЕНКО, И.Б. ГАЛЕЛЮКА,
2019

випадку користувач може керувати бездротовим вимірювальним вузлом та отримувати від нього дані за допомогою мобільного телефону або планшета. Вимірювальний вузол містить кілька біосенсорів. Кожен біосенсор виконано на основі електрохімічного елемента, який містить, наприклад, платиновий електрод, поміщений у скляну трубку, яку закривають мембраною і на поверхню наносять відповідний фермент. Основним призначенням ферменту є пропускання на поверхню електроду іонів інгредієнту, концентрацію якого слід виміряти цим біосенсором. Відповідно, один бездротовий вимірювальний вузол, який містить кілька біосенсорів з різними ферментами, може вимірювати вміст кількох різних складників у напої на будь-якому етапі його виробництва.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, інтернет речей, промисловий інтернет речей.

Введение. Производство пищевых продуктов, в частности, напитков, таких как вино, водочные изделия, коньяки, пиво, питьевая вода, соки и многих других требует контроля качества продукции на всех этапах сложного технологического процесса. Учитывая, что перечисленные напитки относят к продуктам массового потребления, их производством занимаются не только крупные хорошо оснащенные производства, но и множество мелких производителей. Последние, как правило, не обладают необходимым контрольно-измерительным оборудованием, что отражается на качестве их продукции и не позволяет им выйти на международные рынки. Для сравнения отметим, что на украинском рынке вина кроме крупных винодельческих компаний присутствует несколько десятков фермерских хозяйств с сертифицированной продукцией, в то время как во Франции количество фермерских хозяйств, поставляющих вина на мировой рынок, составляет несколько десятков тысяч. При этом потенциал украинских фермеров сравним с потенциалом аналогичных хозяйств во Франции. Поэтому обеспечение технологических процессов производства различных напитков в Украине достаточно простым и недорогим контрольно-измерительным оборудованием может существенно увеличить объемы производства их в Украине, повысить качество конечной продукции и её конкурентоспособность.

В основу контрольно-измерительного оборудования могут быть положены две новые технологии. Первой является технология биологических мультисенсоров [1], которая успешно развивается в Институте молекулярной биологии и генетики НАН Украины [2]. Вторая технология – технология Интернета вещей, в основе

которой находятся беспроводные сенсорные сети. Разработанные в Институте кибернетики имени В.М. Глушкова беспроводные сенсорные сети сейчас широко применяются в аграрной отрасли и при экологическом мониторинге [3]. На основе объединения этих двух технологий может быть создано достаточно простое контрольное оборудование, позволяющее контролировать необходимые параметры напитков на всех этапах их производства.

I. Цель работы

Цель работы состоит в создании распределенной системы контроля качества различных напитков на разных стадиях их производства. Достижение этой цели обеспечивается разработкой и созданием мультибиосенсоров и сенсорных сетей, на основе которых предложено строить распределенные системы контроля.

II. Проектирование распределенной системы контроля

Биосенсор, разработанный в Институте молекулярной биологии и генетики НАН Украины, выполненный на основе электрохимического элемента, показан на рис. 1.

Он состоит из платинового электрода, помещенного в тонкую стеклянную трубку, выходное отверстие трубки закрыто мембраной, на которой находится фермент (рис. 2).

Задача фермента состоит в том, чтобы пропускать на поверхность электрода ионы ингредієнту, концентрация которого измеряется этим биосенсором. Гребенка таких биосенсоров с разными ферментами на их входах, подключенных к измерителю через мультиплексор, представляет собой мультибиосенсор.

Сенсорные сети с мультибиосенсорами позволяют строить на своей основе распределенные системы контроля качества напитков в процессе их производства, причем отдельно на каждой его стадии. Мультибиосенсоры относятся к биосенсорам нового поколения [4] и отличаются высокой чувствительностью и селективностью.



РИС. 1. Биосенсор на основе электрохимического элемента



РИС. 2. Фермент, нанесенный на поверхность мембраны биосенсора

Задача мультибиосенсора заключается в измерении концентрации различных ингредиентов в тестируемом напитке за короткий промежуток времени – не более нескольких минут. Выходным сигналом мультибиосенсора является изменяющийся ток низкого уровня, максимальное значение которого не превосходит единиц наноампер. Для включения мультибиосенсоров в сенсорную сеть разработан аналоговый интерфейс, блок-схема которого показана на рис. 3.

Аналоговый интерфейс включает в себя преобразователь тока в напряжение, АЦП, узлы обработки и передачи данных. Все электронные блоки аналогового интерфейса выполнены на СБИС ADuCM350, ядром которой является ARM Cortex процессор с тактовой частотой 16 МГц, содержащий 16-разрядный АЦП с частотой дискретизации 160 кГц. Внешний вид аналогового интерфейса с блоками программирования и отображения данных приведен на рис. 4.

Вместе с мультибиосенсором и приемопередатчиком интерфейс представляет беспроводный сенсорный узел в составе беспроводной сенсорной



РИС. 3. Блок-схема аналогового интерфейса сенсорной сети

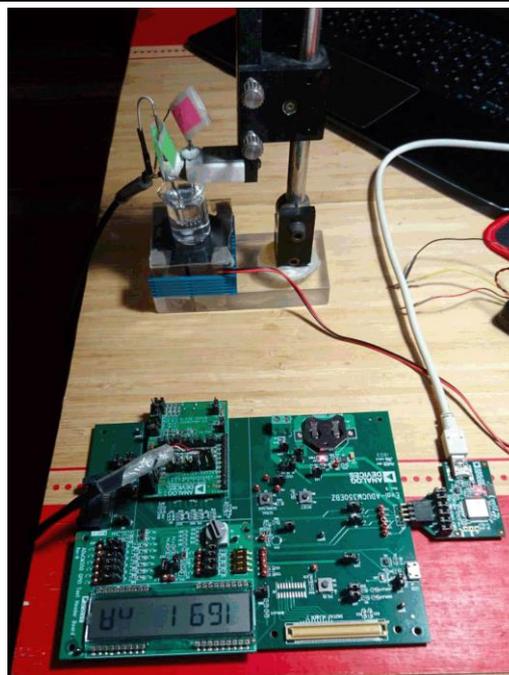


РИС. 4. Внешний вид аналогового интерфейса с блоками программирования и отображения данных

сети. Кроме того, в состав сети входит сетевой координатор. Архитектура разработанной сенсорной сети показана на рис. 5. Первоначально все беспроводные узлы сенсорной сети были построены на основе беспроводного микроконтроллера JN5168 [5].

Каждый узел этой сети включает в себя 32-битный RISC-процессор с тактовой частотой 32 МГц и беспроводной блок, совместимый со стандартом IEEE802.15.4. В сети использован стек ZigBee Pro в качестве беспроводного протокола для организации сети и передачи данных. Основной блок управления данной сети – координатор, обеспечивающий формирование и работу сети. Кроме того, координатор предназначен для сбора, обработки, визуализации и передачи данных в рабочую станцию. Сетевой координатор дополнительно может поддерживать связь с облачной средой, Интернетом или системой более высокого уровня. Разработанная функциональная схема координатора показана на рис. 6.

В составе сети координатор обеспечивает ее конфигурирование, инициализацию, проверку состояния, управление памятью, измерениями, связью и визуализацию данных.

Рабочая станция пользователя представляет собой ПК или ноутбук, оснащенный специальным

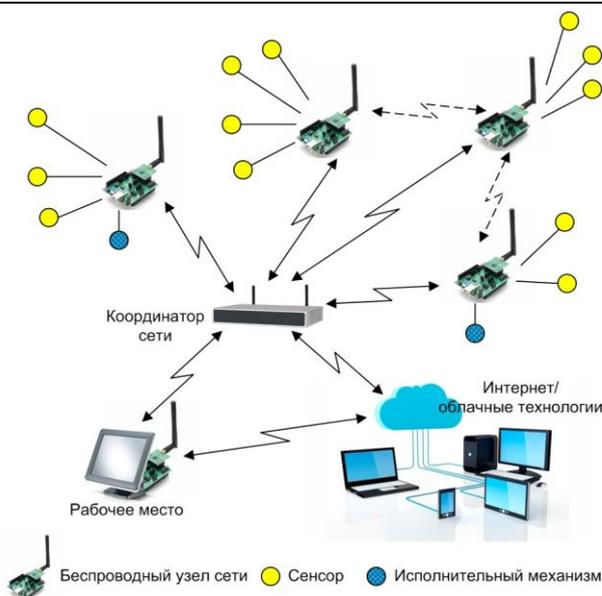


РИС. 5. Архитектура беспроводной сенсорной сети

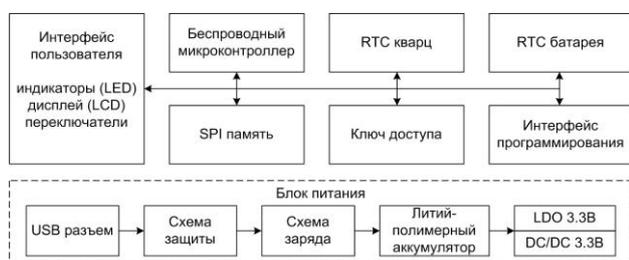


РИС. 6. Функциональная схема координатора сенсорной сети

конвертером ZigBee/USB и прикладным программным обеспечением для анализа и визуализации данных. Основная цель этого конвертера состоит в подключении пользовательского ПК или ноутбука к сети. Такой подход позволяет пользователю контролировать работу сети и просматривать измеренные данные на мониторе компьютера в удобной форме.

Применение беспроводной сенсорной сети на основе протокола ZigBee для контроля качества различных напитков не всегда оправдано, так как связано с подключением пользовательских портативных компьютеров к беспроводной сети с помощью промежуточного преобразователя ZigBee/USB. В мобильных телефонах или планшетах отсутствуют стандартные USB-порты, в тоже время имеются стандартные беспроводные адаптеры типа Wi-Fi или Bluetooth. Кроме того, использование этих портов позволяет в ряде случаев исключить из сети координа-

тор и заменить его мобильным телефоном или планшетным компьютером. Поэтому в последующих версиях беспроводной сети было предусмотрено использование нескольких беспроводных протоколов, в частности, ZigBee и Bluetooth 5. Отметим, что последний протокол ориентирован на устройства с низким энергопотреблением, что важно для эффективного использования беспроводных устройств с батарейным питанием.

К преимуществам протокола Bluetooth 5 (и более поздних версий) относятся следующие. На открытых территориях обмен данными поддерживается на расстоянии 100–150 м, что практически не уступает протоколу ZigBee. В промышленных зданиях для производства напитков эффективная дистанция обмена данными составляет 30–35 метров. Кроме того, при необходимости протокол Bluetooth 5 дает возможность развернуть сеть для площади большого размера, в которую может включать от сотни до нескольких тысяч узлов, используя технологию Bluetooth Mesh. Для этого был выбран беспроводной микроконтроллер типа nRF52840 фирмы Nordic Semiconductor (рис. 7) [6].



РИС. 7. Внешний вид беспроводного контроллера nRF52840

Данный микроконтроллер – это многопротокольное устройство. Он поддерживает следующие протоколы: Bluetooth, Thread, ZigBee, 802.15.4 и др. Микроконтроллер выполнен на основе 32-битного процессора ARM Cortex-M4 с плавающей запятой и тактовой частотой 64 МГц. Он имеет цифровые периферийные устройства и интерфейсы типа SPI и QSPI для сопряжения с внешней флэш-памятью и монитором, а также USB-порт для передачи данных и встроенное зарядное устройство для подзарядки аккумулятора. Переключение протоколов происходит без перезагрузки аппаратного и программного обеспечения. Предусмотрено также параллельное использование разных протоколов. Дополнительное использование протокола Bluetooth бес-

проводных сенсорных узлах позволило значительно расширить функциональные возможности как отдельных узлов, так и сети в целом. Обобщенная архитектура разработанной двухпротокольной беспроводной сенсорной сети показана на рис. 8.

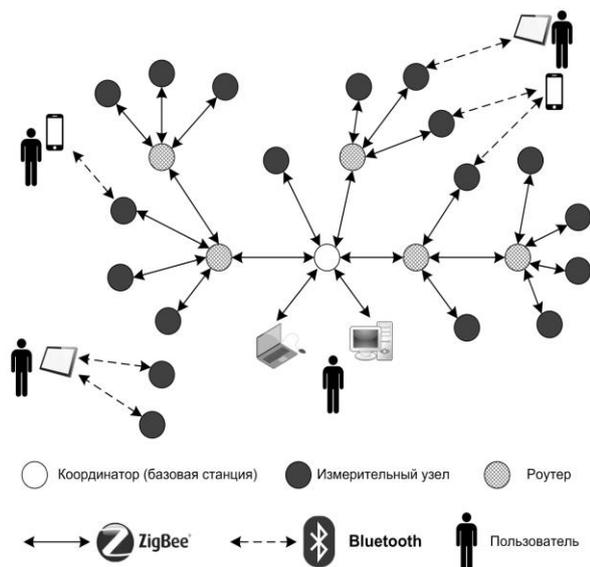


РИС. 8. Архитектура двухпротокольной беспроводной сенсорной сети

Таким образом, сенсорные измерительные узлы могут функционировать в составе сети по протоколу ZigBee и как отдельные автономные сенсоры вне сети по протоколу Bluetooth. В последнем случае пользователь может управлять измерительным узлом и получать от него данные с помощью мобильного телефона или планшета. Следует отметить, что пользователь может взаимодействовать с отдельным сенсорным узлом, даже если узел является частью сети.

Выводы. Беспроводные сенсорные сети и мультибиосенсоры позволяют строить на своей основе распределенные измерительные системы для контроля качества различных напитков. Создание двухпротокольных сенсорных сетей дает возможность пользователям управлять сетью как с помощью программируемых координаторов, так и планшетов или мобильных телефонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pilas J., Yazici Y., Selmer T., Keusgen M., Schöning M. Application of a Portable Multi-Analyte Biosensor for Organic Acid Determination in Silage. *Sensors (Basel)*. 2018 May; 18(5). doi: 10.3390/s18051470
2. Zinchenko O.A., Shkotova L.V., Kulynych T.U., Zinkina O.O., Soldatkin A.P. Improvement of amperometric transducer selectivity using nanosized phenylenediamine films. *Nanoscale Research Letters*. 2017. Vol. 12. N 594.
3. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless smart biosensor for sensor networks in ecological monitoring. Proceeding of the 9th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2017, September 21–23, 2017, Bucharest, Romania. 2017. Vol. 2. P. 679–683.
4. Shkotova L., Pechniakova N., Kukla O., Dzyadevych S. Thin-film amperometric multibiosensor for simultaneous determination of lactate and glucose in wine. *Food Chemistry*. 2016. 197. P.972–978.
5. <https://www.nxp.com/products/wireless/proprietary-ieee-802.15.4-based/zigbee-and-ieee802.15.4-wireless-microcontroller-with-256-kb-flash-32-kb-ram:JN5168> (Останній доступ: вересень 2019).
6. <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF52840> (Останній доступ: вересень 2019).

REFERENCES

1. Pilas J., Yazici Y., Selmer T., Keusgen M., Schöning M. Application of a Portable Multi-Analyte Biosensor for Organic Acid Determination in Silage. *Sensors (Basel)*. 2018 May; 18(5). doi: 10.3390/s18051470
2. Zinchenko O.A., Shkotova L.V., Kulynych T.U., Zinkina O.O., Soldatkin A.P. Improvement of amperometric transducer selectivity using nanosized phenylenediamine films. *Nanoscale Research Letters*. 2017. vol. 12, art. № 594.
3. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless smart biosensor for sensor networks in ecological monitoring. Proceeding of the 9th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2017, September 21–23, 2017, Bucharest, Romania, vol. 2, pp. 679–683.
4. Shkotova L., Pechniakova N., Kukla O., Dzyadevych S. Thin-film amperometric multibiosensor for simultaneous determination of lactate and glucose in wine. *Food Chemistry*. 2016, 197:972-978.
5. <https://www.nxp.com/products/wireless/proprietary-ieee-802.15.4-based/zigbee-and-ieee802.15.4-wireless-microcontroller-with-256-kb-flash-32-kb-ram:JN5168> (last accessed: Sept 2019).
6. <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF52840> (last accessed: Sept 2019).

Получено 30.10.2019